31.261я723
Б40

УДК 621.313 (075.3)

Электрические машины / В. Н. Безрученко, А. С. Хотян.— 2-е изд., перераб. и доп.— К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987.— 215 с.

В учебнике излагаются основные теоретические и технико-экономические положения, описываются элементы конструкций электрических машин и силовых трансформаторов. Практические примеры, устройства основных узлов, рабочие свойства даны в основном применительно к тяговым электрическим машинам. Более подробно рассматриваются машины постоянного тока как важнейшее звено в цепи преобразования энергии на локомотиве. Помещены контрольные вопросы и задачи, позволяющие на конкретных практических примерах закрепить теоретический материал.

В настоящее издание включен ряд вопросов, связанных с развитием теории электромашиностроения, появлением новых государственных стандартов, а также пожеланиями отдельных учебных заведений, использующих первое издание книги.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 1 января 1986 г.

Для учащихся техникумов промышленного транспорта.

Табл. 2. Ил. 100. Библиогр.: 7 назв.

Рецензенты: кандидат технических наук доцент *Б. Г. Долгов* (Днепропетровский горный институт), преподаватель *В. Г. Будяк* (Криворожский политехнический техникум)

Редакция литературы по информатике и автоматике
Зав. редакцией *Г. Ф. Трофимчук*

Б $\frac{2302030000-232}{М211(04)-87}$ БЗ—7—3—87

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является вторым, переработанным и дополненным изданием учебника по электрическим машинам для учащихся техникумов промышленного транспорта. В нее включен ряд материалов, освещающих теорию и практику работы электрических машин с позиций современных научных воззрений. В частности, по-новому объяснены процессы замедленной и ускоренной коммутации, причины возникновения кругового огня; акцентировано внимание на способностях электродвигателей к саморегулированию и показаны преимущества двигателей последовательного возбуждения при использовании их в тяговом электроприводе.

Учитывая важное значение, которое XXVII съезд КПСС придал необходимости сбережения энергетических и материальных ресурсов, в отдельную главу выделены вопросы массо-габаритных характеристик электрических машин, их зависимости от различных номинальных параметров; на конкретном примере показаны причины, приводящие к ухудшению экономических показателей двигателей промышленных или маневровых локомотивов по сравнению с магистральными.

Как и в первом издании, материал в книге изложен таким образом, чтобы с самого начала учащийся получил представление об электрических машинах, процессах преобразования энергии в них и основных уравнениях. Такое изложение, по мнению авторов, особенно необходимо для учащихся заочных отделений, которые осваивают предмет самостоятельно и выполняют лабораторные работы на установочных сессиях до полного изучения соответствующего теоретического материала. Все числовые значения величин и примеры в книге, как правило, приведены для тяговых электрических машин и трансформаторов, применяемых на локомотивах.

Объем и порядок изложения материала соответствуют программе предмета «Электрические машины», поэтому наиболее подробно рассматриваются машины постоянного тока как важнейшее звено в цепи преобразования энергии на локомотиве. С целью лучшего закрепления пройденного материала в конце каждой главы помещены контрольные вопросы и задачи.

Все пожелания и замечания авторами будут приняты с благодарностью. Их следует направлять по адресу: 252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7, Головное издательство издательского объединения «Вища школа».

В.1. История развития и роль электрических машин в электрификации народного хозяйства

Без использования электрической энергии невозможно представить себе ни одну из отраслей народного хозяйства, поскольку этот вид энергии, как ни один другой, легко вырабатывать, трансформировать, передавать на большие расстояния и превращать в другие виды энергии.

Огромную роль в деле построения коммунистического общества отводил электрической энергии В. И. Ленин, выдвинувший гениальную формулу «*Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны*».

В осуществлении ленинских идей об электрификации народного хозяйства значительное место принадлежит электрическим машинам как преобразователям электрической и механической энергии. Электрические машины используются в металлургии и медицине, в космосе и сельском хозяйстве, на морском флоте и железнодорожном транспорте. Изучение электрических машин входит в программу подготовки практически каждого специалиста народного хозяйства.

Начало истории развития электрических машин, а с нею и начало использования их на транспорте относятся к 1834 г., когда русским академиком Б. С. Якоби был создан первый в мире электродвигатель постоянного тока с вращающимся якорем, питающийся от гальванических элементов. Двигатель Б. С. Якоби был установлен на катере, который с 16 пассажирами на борту мог передвигаться по Неве не только по течению, но и против него. В основу работы электродвигателя Б. С. Якоби положил закон электромагнитной индукции, открытый в 1831 г. английским физиком М. Фарадеем.

Первое время как русские, так и иностранные ученые и инженеры работали над совершенствованием машин постоянного тока, которые к концу 80-х годов прошлого века приняли современный вид.

В 1883—1889 гг. русский инженер М. О. Доливо-Добровольский разработал систему трехфазного тока, изобрел

трехфазный генератор и асинхронный двигатель трехфазного тока, а также осуществил передачу электрической энергии трехфазного тока на расстояние. Работы М. О. Доливо-Добровольского и сербского физика Н. Тесла послужили толчком к развитию электрических машин переменного тока.

Электрическая энергия, которую потребляют электродвигатели, на электростанциях вырабатывается с помощью электрических машин большой мощности — генераторов. Для передачи ее на расстояния служат статические электромагнитные аппараты — трансформаторы, которые преобразуют электрическую энергию переменного тока одного напряжения в такую же энергию другого напряжения. Трансформаторы создали в 1876—1882 гг. русские изобретатели П. Н. Яблочков и И. Ф. Усагин. В 1890—1891 гг. М. О. Доливо-Добровольский предложил конструкцию трехфазного трансформатора, принципиально сохранившуюся до настоящего времени.

Трансформаторы не имеют движущихся частей и не являются машинами, но их изучают совместно с электрическими машинами потому, что в основу теории и трансформаторов, и электрических машин положены одни и те же законы, в их конструкциях используются одни и те же материалы.

Первые опыты по применению электрических машин на железнодорожном транспорте были проделаны в 1876 г. русским инженером Ф. А. Пироцким, который использовал рельсы для передачи электрической энергии и тем самым осуществил контактное питание электроподвижного состава.

В 1903 г. русскими инженерами И. Н. Кузнецовым и В. И. Одинцовым были разработаны проекты первых тепловозов с электрической передачей. Однако в условиях общей технической и экономической отсталости царской России попытки ученых доказать целесообразность и эффективность нового вида тяги, добиться создания и внедрения новых типов локомотивов оказались безрезультатными.

Начало бурному развитию электроэнергетики и электромашиностроения в нашей стране положил разработанный в 1920 г. по инициативе В. И. Ленина план ГОЭЛРО. Этот план, названный В. И. Лениным «второй программой партии», предусматривал строительство в течение 10—15 лет электростанций с суммарной мощностью 1700 тыс. кВт. План ГОЭЛРО был выполнен досрочно к 1 января 1931 г.

Электромашиностроение развивается в теснейшей связи с электроэнергетикой, динамика развития которой характеризуется данными табл. В.1.

Таблица В.1

Годы	1950	1965	1970	1975	1980	1985	1990 (план)
Выработка электрической энергии, млрд. кВт·ч	91	507	740,4	1038	1295	1545	1860

XXVII съезд КПСС поставил задачу довести выработку электрической энергии в 1990 г. до 1840—1890 млрд. кВт · ч, плановый показатель утвержден в 1860 млрд. кВт · ч. Соответственно грандиозные задачи поставлены перед советским электромашино- и трансформаторостроением: отечественные заводы должны выпускать генераторы мощностью 1200—1500 МВ · А, предстоит освоить производство электрических машин и другого оборудования с использованием явления сверхпроводимости на основе криогенной техники, ввести в действие электростанции с магнитогидродинамическими генераторами. Поставлена задача увеличить выпуск турбогенераторов единой унифицированной серии мощностью до 800 тыс. кВт, турбогенераторов единичной мощностью до 1 млн. кВт для атомных электростанций, а также новой серии электродвигателей переменного тока мощностью до 400 кВт.

Большой вклад в развитие теории электромагнитных явлений, происходящих в электрических машинах, внесли советские ученые Б. А. Введенский, В. К. Аркадьев, Н. С. Акулов, В. Ф. Миткевич, К. А. Круг и др. Теории проектирования современных электрических машин посвящены труды К. И. Шенфера, М. П. Костенко, А. Е. Алексеева, В. А. Толвинского, Л. М. Пиотровского и др.

Самые различные типы электрических машин, называемых *тяговыми*, применяются на магистральных и промышленных электровозах и тепловозах.

Успешное решение задач, поставленных XXVII съездом КПСС, в значительной степени зависит от уровня подготовки работников, связанных с эксплуатацией тепловозов и электровозов промышленного железнодорожного транспорта, прежде всего специалистов средней квалификации — техников, в совершенстве владеющих своей специальностью.

В.2. Преобразование энергии в электрических машинах. Простейший генератор переменного тока

Электромеханическое преобразование энергии — одно из удивительнейших явлений окружающего нас мира — основано на использовании закона электромагнитной индукции, согласно которому при перемещении со скоростью v проводника длиной l в магнитном поле с индукцией B в проводнике наводится ЭДС

$$e = Blv. \quad (В.1)$$

Это выражение, установленное М. Фарадеем, было преобразовано Д.-К. Максвеллом и для витка, сцепленного с магнитным потоком Ф, приведено к следующему виду в дифференциальной форме:

$$e = -d\Phi/dt. \quad (В.2)$$

Используя выражения (В.1) и (В.2), рассмотрим работу простейшего генератора переменного тока (рис. В.1), состоящего из цилиндрического каркаса с витком *abcd* на нем, помещенного в магнитное поле, создаваемое полюсами магнита N и S. Каждая из сторон витка (*ab* и *cd*) соединена со своим кольцом. К кольцам примыкают щетки *A* и *B*, с помощью которых виток электрически соединяется с внешней цепью, имеющей сопротивление $R_н$. У этого простейшего электрического генератора есть все важнейшие элементы реальной электрической машины.

Условимся называть линию, проходящую через центр цилиндра по середине между полюсами магнита, *линией геометрической нейтрали*, а часть окружности, относящуюся к одному полюсу,— *полюсным делением* τ.

Приведем цилиндр с витком во вращение. Направление наводимой в проводнике ЭДС определится при этом по *правилу правой руки*: расположим ее ладонь так, чтобы в нее

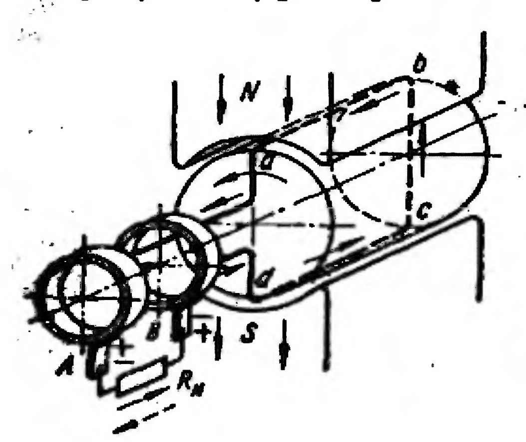


Рис. В.1. Простейший генератор переменного тока

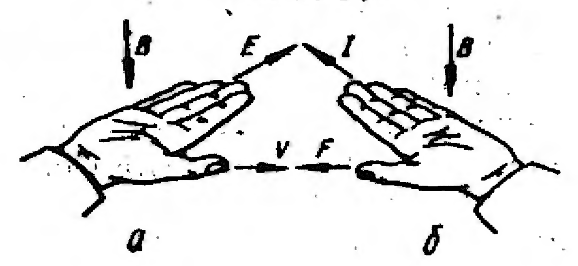


Рис. В.2. Правила правой (*а*) и левой (*б*) рук

входили линии магнитной индукции; отведенный большой палец направим по движению проводника; тогда остальные пальцы руки покажут направление ЭДС (рис. В.2, *а*).

Когда проводник *ab* находится под полюсом N, в нем наводится ЭДС одного направления, а когда под полюсом S — другого.

Следовательно, в проводнике *ab* и в витке *abcd* в целом наводится переменная во времени ЭДС, период которой равен T. Число периодов, приходящихся на 1 с, называется *частотой* f, так что $f = 1/T$.

Если в машине имеется p пар полюсов, а частота вращения витка равна n, то за один оборот в нем будет p периодов наводимой ЭДС частотой

$$f = pn. \tag{B.3}$$

Поскольку кольца замкнуты через щетки A и B на внешнюю цепь, по ней потечет ток, имеющий ту же частоту f.

Простейший генератор переменного тока, преобразующий механическую энергию в электрическую (см. рис. В.1), состоит из двух основных частей: неподвижной, называемой *статором*, и вращающейся, называемой *ротором*. Та часть машины, которая создает магнитное поле, называется *индуктором*, а та ее часть, в которой наводится ЭДС и происходит преобразование энергии,— *якорем*.

В.3. Выпрямление переменного тока в постоянный с помощью коллектора. Простейший генератор постоянного тока

Чтобы заставить полученный переменный ток протекать во внешней цепи в одном направлении, заменим кольца генератора на рис. В.1 на изолированные друг от друга полукольца (рис. В.3). Такое выпрямительное устройство называется *коллектором*, а полукольца — его *пластинами*.

Щетки A и B расположим так, чтобы они переходили с одной пластины на другую, тогда, когда виток *abcd* находится на линии геометрической нейтрали, т. е. тогда, когда ЭДС в витке равна нулю.

Теперь каждая из щеток будет соприкасаться только с той пластиной и проводником, который находится под данным полюсом (щетка A — с проводником, находящимся под полюсом N, а щетка B — под полюсом S). Следовательно, во внешней цепи ток будет протекать всегда в одном направлении — от щетки A к B — и иметь вид, показанный на рис. В.4. Произошло выпрямление наведенной в витке

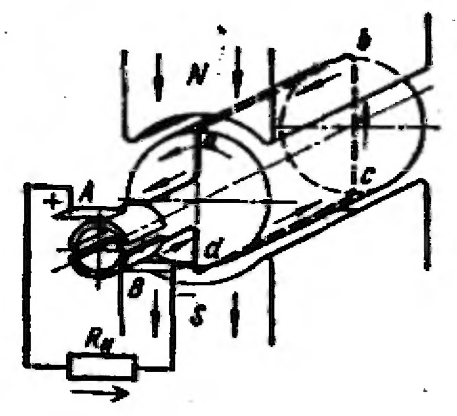




Рис. В.3. Простейший генератор постоянного тока

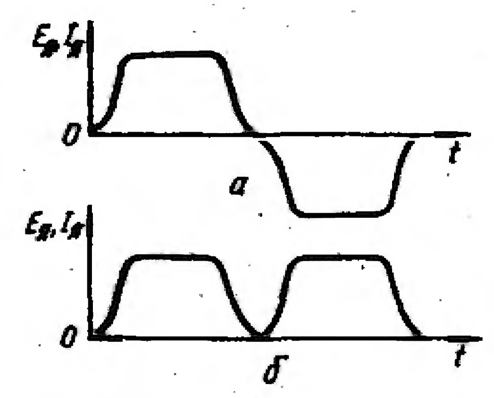


Рис. В.4. Кривые ЭДС и тока якоря (*а*) и во внешней цепи (*б*) простейшего генератора постоянного тока

переменной ЭДС и тока в ЭДС и ток *одного направления во внешней цепи.*

Выпрямив переменный ток в постоянный с помощью коллектора, мы получили *генератор постоянного тока,* в якоре которого так же, как и в генераторе переменного тока, протекает переменный ток.

Коллектор является сложным устройством, а скользящий контакт щетка — коллектор, как будет показано ниже, во многом осложняет работу машины. Поэтому возникает вопрос: нельзя ли создать электрический генератор, в якоре которого сразу наводилась бы постоянная ЭДС? Но если мы хотим получить постоянную ЭДС, т. е. иметь постоянную левую часть в выражении (В.2), то, следовательно, должна быть постоянной и его правая часть. Однако знаменателем в правой части выражения (В.2) является время, которое необратимо и имеет только одно измерение. Значит, чтобы правая часть была постоянной, необходимо непрерывное и беспредельное увеличение магнитного потока, что, конечно, невозможно. Таким образом, электрическая машина может быть создана на основе закона электромагнитной индукции лишь в том случае, если в ее якоре наводится переменная ЭДС.

В.4. Обратимость электрических машин. Основные положения энергопреобразования

Согласно закону Био — Савара, на движущийся в магнитном поле проводник с током I действует сила

$$F = BlI, \qquad (В.4)$$

направление которой определяется по *правилу левой руки* (рис. В.2, *б*). Поэтому если к щеткам машины переменного

тока (см. рис. В.1) подвести переменный ток, то возникнет сила, которая заставит проводники *ab* и *cd* перемещаться в магнитном поле, и виток *abcd* начнет вращаться. Необходимо только, чтобы частота *f* тока соответствовала в период пуска частоте вращения *n* [выражение (В.3)]. Аналогичное явление будет иметь место, если к щеткам машины постоянного тока (см. рис. В.3) подвести постоянный ток. Коллектор в этом случае будет играть роль *инвертора,* превращая подведенный постоянный ток в переменный внутри якоря. Таким образом, мы получим *электрический двигатель,* который, в отличие от генератора, преобразует электрическую энергию в механическую.

По закону Ленца, индуцированный ток всегда имеет такое направление, при котором возникающая электромагнитная сила стремится препятствовать тому изменению (движению), благодаря которому индуцируется ток.

На основании упомянутых выше законов и принципа работы простейших электрических машин можем сформулировать следующие основные положения энергопреобразования:

1) непосредственное взаимообратное преобразование механической и электрической энергии в индуктивных электрических машинах возможно лишь тогда, когда последняя является энергией переменного тока;

2) для такого энергопреобразования необходим электрический контур с изменяющейся индуктивностью (в нашем случае это поворачивающийся в магнитном поле виток);

3) для преобразования переменного тока в постоянный в электрическом контуре должно быть изменяющееся электрическое сопротивление (роль его в электрических машинах играет контакт щетка — коллектор, сопротивление которого меняется от бесконечности, когда щетка не касается коллекторной пластины, до некоторой минимальной величины, когда щетка полностью перекрывает пластину);

4) любая электрическая машина энергетически обратима, т. е. принципиально равноценно может работать и как генератор, и как двигатель;

5) поскольку для проявления закона электромагнитной индукции необходимо лишь относительное перемещение проводника и магнитного поля, любая электрическая машина кинематически обратима, т. е. у нее может вращаться или якорь, или индуктор.

В.5. Электромагнитные соотношения при энергопреобразовании

Рассмотрим этот вопрос на примере простейшей машины постоянного тока (см. рис. В.3), которая, как видно из предыдущего, является частным случаем электромеханического преобразователя энергии.

Генератор. Принято считать, что щетка, через которую ток уходит от генератора, является *положительной* (+), а к которой ток подходит — *отрицательной* (—).

Так как ЭДС, наводимая в проводнике, определяется выражением (В.1), то ЭДС в витке, состоящем из двух проводников *ab* и *cd*, будет

$$E = 2e = 2Blv. \quad (B.5)$$

Известно, что среднюю индукцию можно представить как магнитный поток, приходящийся на единицу площади, которую он пронизывает:

$$B = \Phi/S. \quad (B.6)$$

Скорость перемещения проводника в магнитном поле при вращении якоря диаметром $D_я$ с частотой n равна

$$v = \Omega D_я/2 = \pi D_я n, \quad (B.7)$$

где угловая скорость $\Omega = 2\pi n$.

Подставив (В.6) и (В.7) в (В.5), получим

$$E = 2\Phi l \pi D_я n/S = c_e n\Phi, \quad (B.8)$$

где $c_e = 2\pi l D_я/S$ — постоянная.

Из (В.8) следует, что *средняя ЭДС в витке электрической машины пропорциональна произведению частоты вращения и магнитного потока* и не зависит от формы кривой распределения индукции в воздушном зазоре между витком и магнитом.

Если к щеткам генератора (см. рис. В.3), сопротивление якорной обмотки которого $R_я$, подключить нагрузку сопротивлением $R_н$, через которую проходит ток $I_я$, то, согласно закону Кирхгофа для контура якорь — нагрузка, можно записать

$$E = I_я R_я + I_я R_н = I_я R_я + U_г. \quad (B.9)$$

Отсюда напряжение на щетках генератора

$$U_г = E - I_я R_я. \quad (B.10)$$

Электромагнитный момент, действующий на якорь простейшего генератора с витком *abcd*, равен

$$M_{эм} = FD_я. \quad (B.11)$$

Подставив в (В.11) значения силы из (В.4) и индукции из (В.6), после объединения всех постоянных величин получим

$$M_{эм} = D_я \Phi l I_я / S = c_м \Phi I_я. \quad (В.12)$$

Выражение (В.12) позволяет сформулировать весьма важный вывод: электромагнитный момент электрической машины возникает в результате *взаимодействия магнитного потока полюсов и тока в якоре,* которые являются двумя сторонами одного особого вида материи — *электромагнитного поля.*

Согласно первому закону Ньютона, подведенный к валу якоря генератора вращающий момент за вычетом части, расходуемой на преодоление момента сопротивления, о котором подробно будет сказано ниже, уравновешивается электромагнитным моментом:

$$M_{вал} - M_{сопр} = M_{эм}. \quad (В.13)$$

Двигатель. Щетка двигателя, к которой подходит ток, считается *положительной* (+), а от которой ток отходит — *отрицательной* (—). Когда по якорю проходит ток, появляется электромагнитный момент и якорь двигателя начинает вращаться, в проводниках его обмотки наводится ЭДС, направление которой, согласно закону Ленца, должно быть таким, чтобы препятствовать тому действию, в результате которого она возникает. Следовательно, ЭДС в якоре двигателя направлена против тока. Поэтому ЭДС якоря двигателя называется также *противо-ЭДС.*

К якорю двигателя прикладывается напряжение $U_{дв}$ и в нем протекает ток $I_я$, т. е. подводимая мощность равна $U_{дв} I_я$. Часть этой мощности расходуется на нагрев обмотки якоря. Внутренняя мощность, развиваемая якорем, $P_я = EI_я$; следовательно, $U_{дв} I_я - I_я^2 R_я = EI_я$, откуда

$$U_{дв} = E + I_я R_я, \quad (В.14)$$

т. е. подводимое к якорю напряжение уравновешивается противо-ЭДС и падением напряжения в его обмотке, составляющем обычно 5—10 % напряжения $U_{дв}$.

Если из развиваемого якорем электромагнитного момента вычесть часть, расходуемую на преодоление момента сопротивления, то останется тот полезный механический момент, который двигатель имеет на валу:

$$M_{эм} - M_{сопр} = M_{вал}. \quad (В.15)$$

Общее выражение. Из механики известно, что мощность есть произведение момента на угловую скорость; тогда элект-

ромагнитная мощность

$$P_{эм} = M_{эм}\Omega, \quad (В.16)$$

где

$$\Omega = 2\pi n = 2v/D_я. \quad (В.17)$$

Подставив (В.12) и (В.17) в (В.16), получим

$$P_{эм} = D_я \frac{\Phi}{S} lI_я \frac{2v}{D_я} = 2BlvI_я = EI_я = P_я. \quad (В.18)$$

Таким образом, электромагнитная мощность равна внутренней мощности якоря, и это отражает процесс взаимообратного преобразования электрической и механической энергии в электрических машинах.

В.6. Классификация электрических машин и их номинальные величины

Основным назначением электрических машин является электромеханическое преобразование энергии. Современные электрические машины изготавливают с очень широкими диапазонами мощностей (от долей ватта до полутора миллионов киловатт) и частот вращения (от одного оборота в час до 100 000 об/мин). Все это накладывает определенные требования к конструкции и применяемым материалам, поэтому диапазон мощностей электрических машин условно делят на четыре группы:

Микромашины	до 500 Вт
Машины:	
малой мощности	0,5—50 кВт
средней »	50—500 кВт
большой »	свыше 500 кВт

Электрические машины могут использоваться для усиления мощности электрических сигналов в различных системах управления. Такие машины называются *электромашинными усилителями*. Для преобразования частоты вращения в электрический сигнал служат *тахогенераторы*, а для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала,— *сельсины*. Все эти виды электрических машин находят применение на транспорте.

По принципу действия электрические машины разделяют на две группы: *коллекторные* и *бесколлекторные*.

Коллекторные машины используют главным образом на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Однако существуют и коллекторные машины переменного

тока, которые в настоящее время применяют в системах, где необходима высокая (более 3000 об/мин) частота вращения.

Бесколлекторные машины делят на *синхронные* и *асинхронные*. Это машины переменного тока. Синхронные машины работают в качестве генераторов и, реже, как двигатели. Асинхронные машины — это главным образом электродвигатели. Оба этих типа машин переменного тока используют на локомотивах.

Номинальный режим работы электрической машины, т. е. режим при условиях, для которых она предназначена, характеризуется следующими величинами: мощностью, напряжением, током, частотой вращения, КПД и электромагнитным моментом.

Следует различать номинальную *электрическую* мощность генератора и *механическую* мощность на валу двигателя.

В.7. Материалы, применяемые в электромашиностроении

Для получения электромагнитного момента в электрической машине необходимо наличие магнитного потока (его создают полюсы) и тока в обмотке якоря. Следовательно, основу электрической машины должны составлять магнито- и токопроводящие материалы. Изолирование последних от корпуса или друг от друга выполняют изоляционными материалами.

Для изготовления узлов и деталей, главным назначением которых является восприятие и передача механических нагрузок (валы, станины, подшипниковые щиты, крепежные детали и т. п.), применяют конструктивные материалы.

Магнитопроводящие материалы. Наиболее важными являются различные сорта листовой электротехнической стали, в состав которой для уменьшения потерь на вихревые токи и гистерезис вводят кремний.

Электротехнические стали выпускают толщиной 0,5 и 0,35 мм и различают по двум важнейшим признакам: сталь может быть *изотропной*, имеющей практически одинаковую магнитную проводимость в направлении и поперек проката, или *анизотропной*, у которой магнитная проводимость резко отличается в указанных направлениях.

Обозначение марок стали состоит из четырех цифр, условно характеризующих основные свойства стали: первая — класс по структурному состоянию и виду прокатки (1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотроп-

ная, 3 — холоднокатаная анизотропная); вторая — содержание кремния (0 — нелегированная, 1 — содержание кремния от 0,4 до 0,8 %, 2 — свыше 0,8 до 1,8 %, 3 — свыше 1,8 до 2,8 % и т. д.); третья — основная нормируемая характеристика (удельные потери при данной индукции и частоте 50 Гц); четвертая — порядковый номер типа стали.

Раньше для изготовления сердечников якорей применялась горячекатаная изотропная сталь (большей частью марки 1312). Последнее время она вытесняется холоднокатаной изотропной сталью, обладающей более высокими магнитными показателями, например, марки 2312.

Для изготовления шихтованных сердечников полюсов, не подверженных периодическому перемагничиванию, применяют холоднокатаную анизотропную сталь марки 3411.

Токопроводящие материалы. Благодаря хорошей электропроводности, относительной дешевизне и достаточной механической прочности, основным токопроводящим материалом является медь. Однако запасы ее сравнительно ограничены и поэтому ведутся работы по ее замене, в первую очередь, алюминием или его сплавами.

Удельное сопротивление при температуре 20 °С для электролитической отожженной меди составляет $(17{,}24 \div 17{,}54) \cdot 10^{-9}$ Ом · м, а для рафинированного алюминия — $28{,}2 \cdot 10^{-9}$ Ом · м при плотности соответственно 8,9 т/м^3 и 2,65 т/м^3. Существенно большее (практически в 1,6 раза) удельное сопротивление алюминия и худшие механические свойства препятствуют его широкому использованию в электрических машинах.

Изоляционные материалы. Эти материалы должны обладать достаточной электрической и механической прочностью, нагревостойкостью и теплопроводностью. В основном изоляционные материалы могут изготавливаться на основе естественных органических материалов (бумага, древесина, шелк), неорганических материалов (слюда, стекловолокно, асбест), различных синтетических материалов (пленки, эмали, лаки). Жидкие или газообразные диэлектрики чаще всего применяются в трансформаторах.

При работе электрические машины и трансформаторы нагреваются, что приводит к выходу из строя их электрической изоляции. Изоляционные материалы под действием температуры высыхают, растрескиваются, теряют свои электрические и механические свойства: изоляция стареет. Поэтому, когда говорят о допустимой нагрузке машины или трансформатора, то имеют в виду, что она прежде всего определяется *допустимой температурой* для изоляционных

материалов. И если машина рассчитывается на срок службы 16—20 лет, то нагревостойкость используемой изоляции должна обеспечивать экономически целесообразный до ремонта срок службы.

Конечно, и машину, и трансформатор можно выполнить не нагревающимися в процессе эксплуатации. Но использование их материалов при этом будет чрезвычайно неэффективным, изделие получится тяжелым и дорогим. Нужно построить высокоэффективную машину с длительным сроком службы.

Все изоляционные материалы по нагревостойкости делятся на классы. Допустимая температура для каждого из классов следующая:

Классы изоляции	Y	A	E	B	F	H	C
Допустимая температура, °C	90	105	120	130	155	180	свыше 180

Срок службы изоляции даже при небольшом превышении температуры, допустимой для данного класса, резко убывает. Поэтому в условиях эксплуатации температура никогда не должна превышать допустимую.

Конструктивные материалы. В качестве этих материалов используют сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, а также пластмассы. К ним предъявляются требования, общие в машиностроении.

Контрольные вопросы

1. Какие основные законы электротехники положены в основу теории работы электрических машин?
2. Как называются основные части, из которых состоит электрическая машина?
3. Почему любая электрическая машина энергетически и кинематически обратима?
4. Когда возможно наведение ЭДС и появление электромагнитного момента? Каковы условия их возникновения?
5. Какие существуют основные типы электрических машин? Как они классифицируются?
6. Почему нельзя создать бесколлекторную машину постоянного тока?
7. Какие виды материалов используются в электромашиностроении, каковы их основные свойства?
8. Что такое нагревостойкость изоляции, каковы ее классы?

Раздел первый
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Принцип действия машины постоянного тока. Электрические градусы

Характерным признаком машины постоянного тока (за исключением особых — униполярных машин) является наличие у них *коллектора* — механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот. Простейший коллектор, состоящий из двух пластин, показан на рис. В.3. С его помощью во внешней цепи генератора потек ток одного направления, но меняющийся от нуля до максимального значения и затем снова до нуля (см. рис. В.4, *б*). Конечно, это еще не «настоящий» постоянный ток.

Представим себе, что на якоре генератора уложено два витка под углом 90° друг к другу; тогда коллектор будет состоять из четырех пластин. Теперь вид кривой выпрямленного тока во внешней цепи, в отличие от рис. В.4, *б*, будет выглядеть так, как показано на рис. 1.1 жирной линией. Как видно, ток во внешней цепи теперь хоть и изменяется по значению (пульсирует), но не до нуля, а лишь немного отличается от максимума. Значит, если на якоре будет много витков, а на коллекторе много пластин, пульсация тока станет небольшой. Можно показать, что при восьми пластинах, приходящихся на один полюс, пульсация не превышает 1 %, т. е. становится незаметной, а ток — практически постоянным.

В электрической машине может быть много полюсов, но основой в изучении теории работы является машина *двухполюсная,* ибо пара полюсов — северный и южный — неразделима. Поэтому говорят, что машина имеет p пар полюсов. Очевидно, у двухполюсной машины полюсы противоположной полярности расположены под углом 180° по отношению друг к другу. А если полюсов $2p$, то как же определять угол между ними? Как выглядели бы кривые выпрямленного тока на рис. 1.1, если бы у машины было две пары полюсов, т. е. $p = 2$ или $2p = 4$ (четырехполюсная машина)? Картина на рис. 1.1 не изменилась бы: дело в том, что угол поворота якоря следует в таком случае исчислять в *электрических градусах*. Что же такое электрический градус?

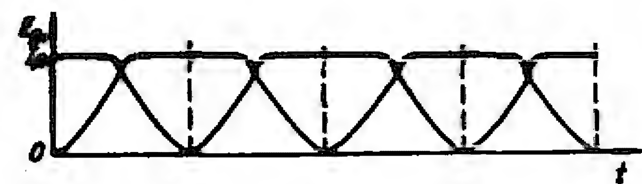


Рис. 1.1. Кривые ЭДС и тока во внешней цепи простейшего генератора постоянного тока с двумя витками на якоре

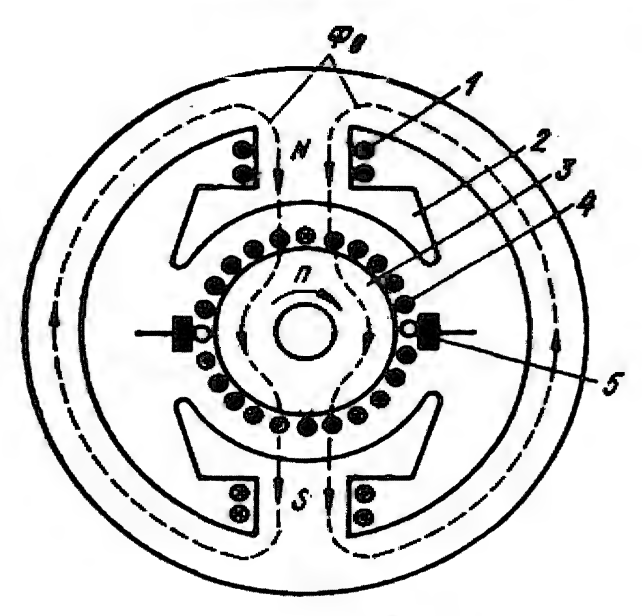


Рис. 1.2. Электромагнитная схема машины постоянного тока

В кривой ЭДС и тока на рис. В.4, *а* полный период соответствует 360° поворота якоря. Он соответствует двойному полюсному делению 2τ. Но если $2p = 4$, то один оборот соответствует 4τ. Таким образом, если машина имеет $2p = 2$ полюса, то число электрических градусов соответствует числу геометрических градусов: за один оборот будет пройдено 360° эл. Если же $2p = 4$, то за один оборот (360° геометрических) будет пройдено 720° эл. Следовательно, *один геометрический градус соответствует p электрическим*.

Магнитный поток машины постоянного тока (рис. 1.2) создается обмоткой возбуждения *1*, расположенной на полюсах *2* статора. На роторе размещена обмотка, в которой индуцируется ЭДС. Таким образом, индуктор машины постоянного тока расположен на статоре, а якорь *3* и его обмотка *4* — на роторе.

Как видно из рис. 1.2, во всех проводниках, расположенных под одним полюсом, направление ЭДС одинаковое и сохраняется таким независимо от частоты вращения. Следовательно, ЭДС проводников, лежащих выше геометрической нейтрали, всегда направлена в одну сторону, а ЭДС проводников, лежащих ниже геометрической нейтрали,— в другую сторону.

При вращении якоря индуцируемая в проводниках ЭДС меняет знак, когда проводники перемещаются от одного полюса к другому. Поскольку количество проводников, соединенных соответствующим образом и находящихся под одним полюсом, остается неизменным, их суммарная ЭДС также неизменна. Эта ЭДС снимается с обмотки якоря при

помощи скользящего контакта — щеток *5*, установленных на коллекторе, к пластинам которого подсоединены проводники якоря.

Если щетки не замкнуты на внешнюю цепь, то ток по обмотке якоря не проходит, так как ЭДС, индуцируемые в разных частях обмотки, взаимно компенсируются. Очевидно, ЭДС E на щетках будет наибольшей, если щетки расположены так, что соприкасаются с проводниками, расположенными на линии геометрической нейтрали.

Если к щеткам подключить нагрузочный резистор, то по нему потечет ток $I_я$, направление которого соответствует направлению ЭДС E. В обмотке якоря этот ток разветвляется и проходит в данном конкретном случае по двум параллельным ветвям.

1.2. Устройство машины постоянного тока

Общий вид машины постоянного тока представлен на рис. 1.3.

Статор. Состоит из станины, которая служит для проведения магнитного потока от полюса к полюсу и одновременно несет на себе все конструктивные элементы машины. Станины выполняют (отливают) обычно из стали. Круглые

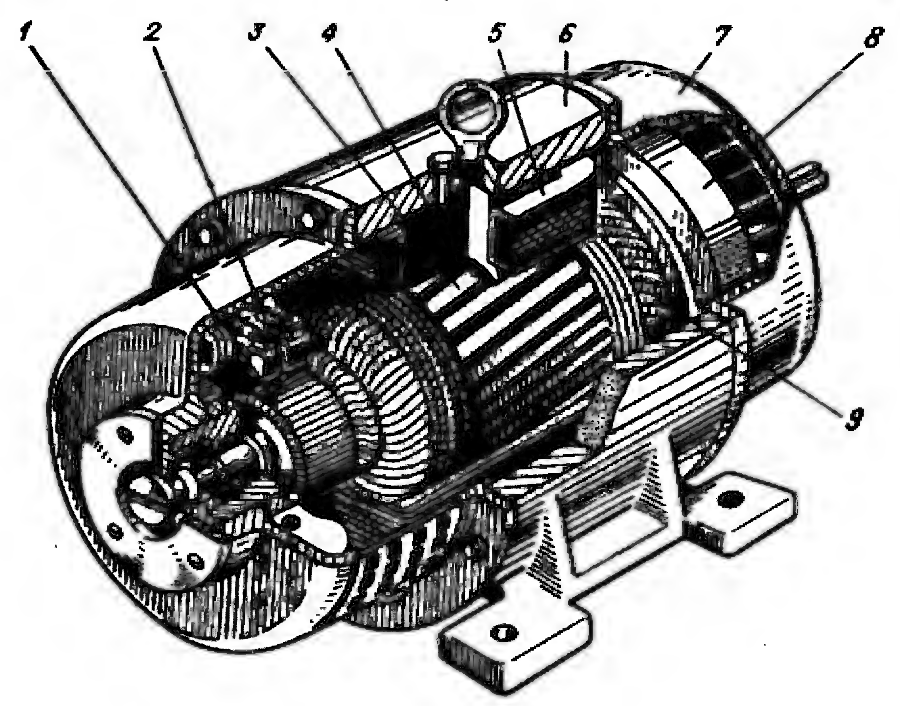


Рис. 1.3. Устройство машины постоянного тока:
1 — коллектор; *2* — щетки; *3* — сердечник якоря; *4* — главный полюс; *5* — обмотка возбуждения; *6* — станина; *7* — подшипниковый щит; *8* — вентилятор; *9* — обмотка якоря

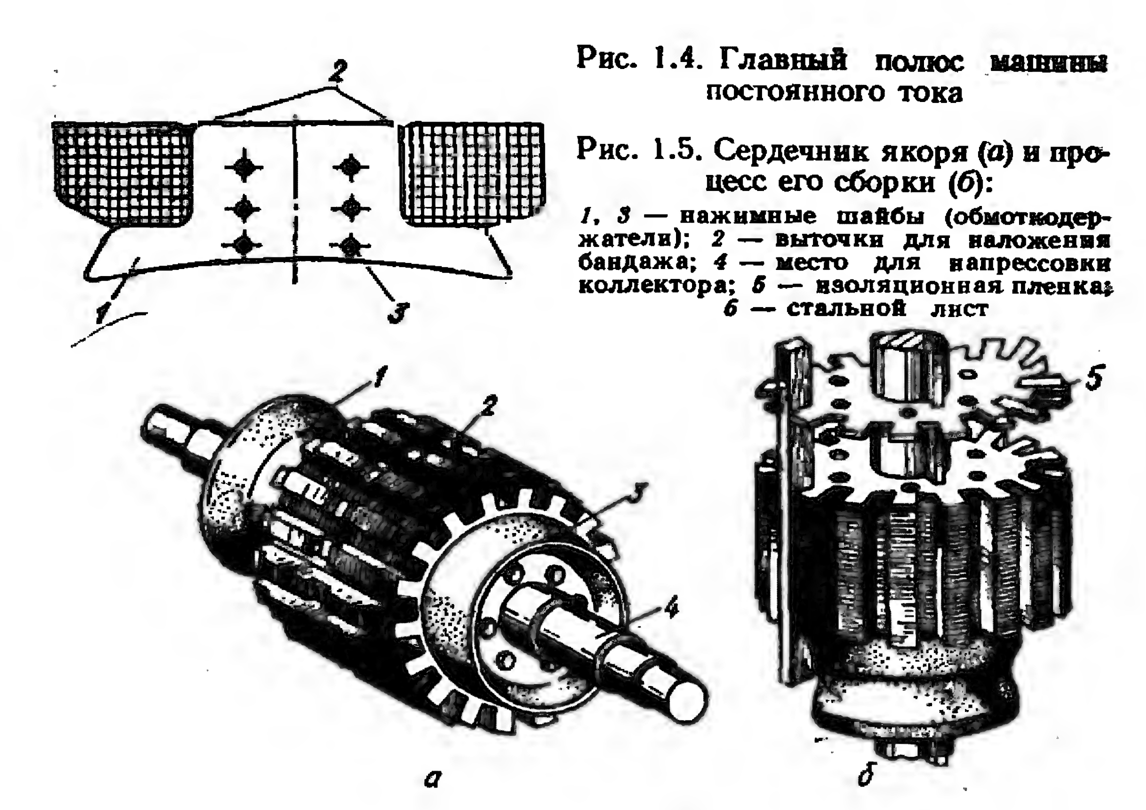


Рис. 1.4. Главный полюс машины постоянного тока

Рис. 1.5. Сердечник якоря (*а*) и процесс его сборки (*б*):

1, 3 — нажимные шайбы (обмоткодержатели); *2* — выточки для наложения бандажа; *4* — место для напрессовки коллектора; *5* — изоляционная пленка; *6* — стальной лист

станины крупных электрических машин изготовляют на вальцах из стального листа. Тяговые электродвигатели локомотивов имеют граненые станины, называемые также *остовами*. Такая конструкция их позволяет уменьшить габаритные размеры четырехполюсных машин.

По торцам к станине прикрепляют подшипниковые щиты, в которых устанавливают якорные подшипники. Внутри станины устанавливают главные полюсы с обмотками возбуждения, а между ними, точно на линии геометрической нейтрали,— добавочные полюсы, которые служат для уменьшения искрения под щетками (см. гл. 5).

На рис. 1.4 показан главный полюс машины, состоящий из сердечника *1* и обмотки *2*, по которой проходит ток. Полюс представляет собой электромагнит. Сердечники полюсов набирают из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, например анизотропной марки 3411, иногда используют сталь Ст3 толщиной 1,5—2 мм. Сердечник стягивают шпильками *3*, которые расклепывают на концах.

Нижняя, уширенная часть сердечника называется *полюсным наконечником*, или *башмаком*. Полюсы крепят к станине болтами. Для изготовления болтов добавочных полюсов иногда применяют немагнитную (нержавеющую) сталь с целью уменьшения магнитного насыщения полюса.

Обмотки полюсов изготавливают из изолированного медного круглого или прямоугольного провода. Обмотки

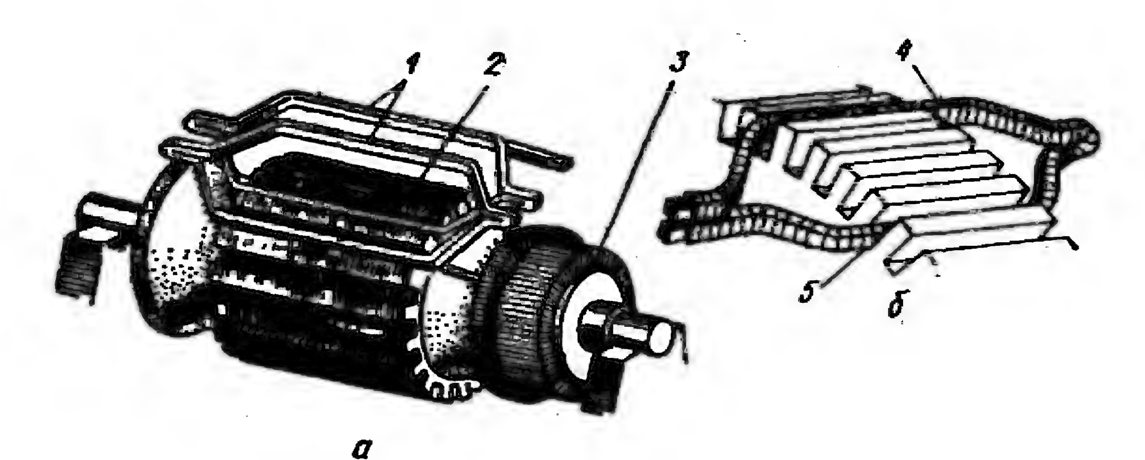


Рис. 1.6. Наложение обмотки на сердечник якоря (*а*) и расположение якорных катушек в пазах (*б*)

всех главных полюсов соединяют обычно последовательно, как и добавочных.

Якорь. Сердечник якоря (рис. 1.5) собирают на валу из изолированных (для уменьшения потерь от вихревых токов) листов из электротехнической стали. Собранный сердечник спрессовывается и закрепляется нажимными шайбами, которые могут одновременно служить обмоткодержателями. Проштампованные в листах отверстия образуют в собранном сердечнике аксиальные вентиляционные каналы.

Обмотку якоря изготавливают из провода круглого или прямоугольного сечения; обычно она состоит из отдельных, заранее отформованных и изолированных якорных катушек *1* (рис. 1.6), размещаемых в пазах сердечника *2* якоря.

Обмотку выполняют двухслойной; в каждом пазу размещают две стороны *4*, *5* различных якорных катушек — одну поверх другой с прокладкой между ними. Каждая якорная катушка состоит из нескольких секций, концы которых припаивают к соответствующим пластинам коллектора *3*. Секции могут быть одно- или многовитковыми. Примером одновитковой секции может служить виток на якоре простейшего генератора (см. рис. В.3).

Коллектор. Это — один из основных и наиболее сложных узлов электрической машины постоянного тока. Обычно у современных машин, особенно у тяговых двигателей локомотивов, коллекторы находятся на пределе использования материалов и технологических возможностей.

Коллекторы собирают из медных пластин *4* трапецеидальной формы, изолированных друг от друга изоляционными прокладками *5*, а от корпуса *1*, *2* — миканитовыми изоляционными манжетами *3* (рис. 1.7). Пластины закрепляют на «*ласточкиных хвостах*», и после ряда запрессовок в горячем

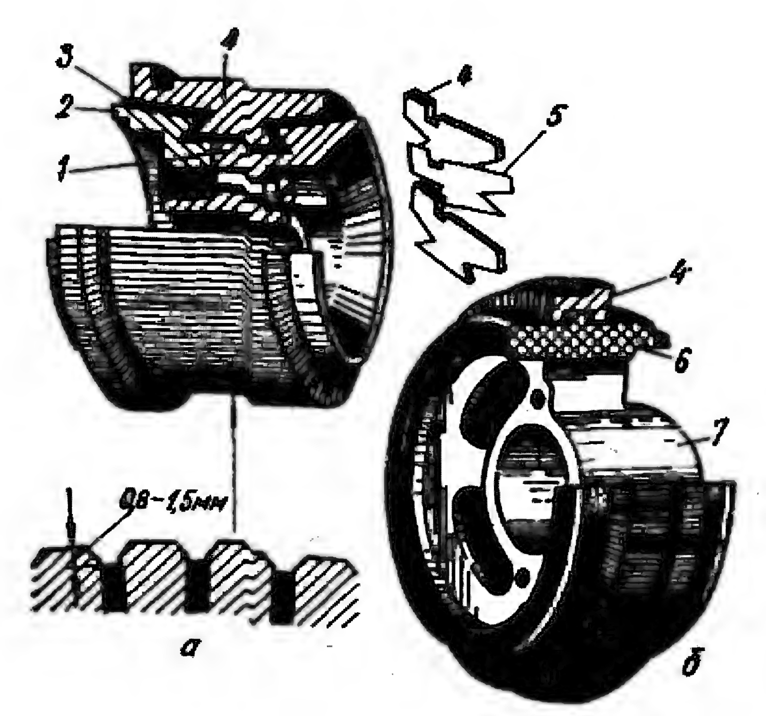


Рис. 1.7. Коллекторы с металлическим (*а*) и пластмассовым (*б*) корпусами

состоянии коллектор обтачивают и шлифуют, чтобы его поверхность была строго цилиндрической. Концы обмотки якоря впаивают в окончания коллекторных пластин, называемых *«петушками»*. При большой разнице между диаметрами якоря и коллектора петушки выполняют из отдельных медных шин, привариваемых к коллекторным пластинам.

В машинах сравнительно небольших размеров, в том числе применяемых и на транспорте, коллектор изготавливают с пластмассовым корпусом *6*, закрепляемым на втулке *7*.

Для обеспечения длительной работы скользящего контакта по коллектору без ударов о выступающие изоляционные прокладки коллекторы в процессе изготовления подвергают продорожке, во время которой снимают верхнюю часть изоляционных прокладок так, чтобы они оказались утопленными на глубину до 1,5 мм.

У быстроходных машин длинные коллекторы крепят дополнительно с помощью кованых бандажных колец, насаживаемых сверху на коллектор и изолированных от его поверхности. Эти кольца препятствуют выпучиванию коллекторных пластин под действием центробежных сил и нагревания коллектора.

Щеточный аппарат. Служит для подвода или отвода тока от вращающегося коллектора. Щеточный аппарат тягового

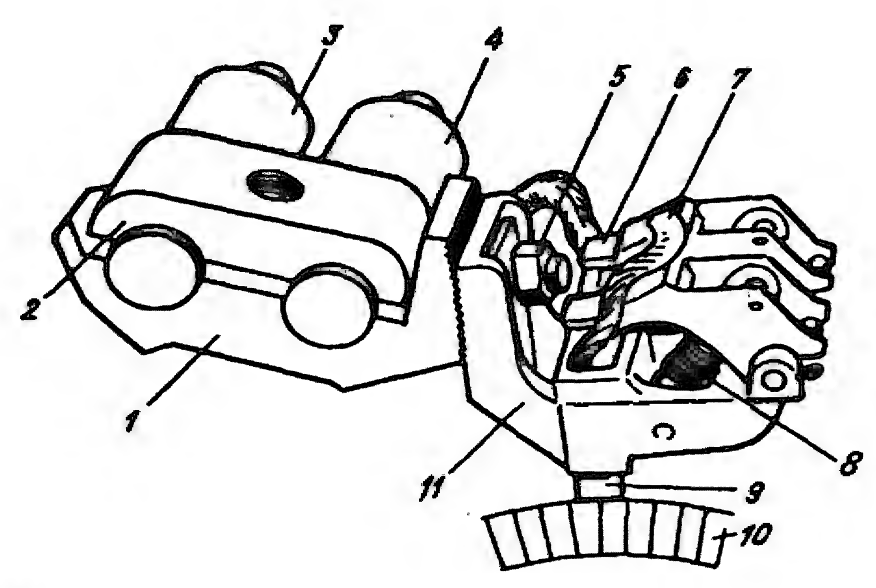


Рис. 1.8. Кронштейн с пальцами и щеткодержатель

двигателя (рис. 1.8) состоит из стального разъемного кронштейна *1*, *2*, который крепится на двух изоляционных пальцах *3* и *4*, представляющих собой шпильки, опрессованные прессмассой АГ-4В. Латунный корпус щеткодержателя *11* с помощью болта и гайки *5* крепится к кронштейну. Их соприкасающиеся поверхности изготовлены в виде гребенки для надежного крепления и регулирования зазора между щеткодержателем и рабочей поверхностью коллектора *10*. Нажимные пружинные пальцы *6* с помощью пружин *8* осуществляют практически постоянное нажатие на щетку *9* при ее срабатывании в процессе эксплуатации.

Если щетка износилась более допустимого предела, давление нажимного пальца на нее автоматически прекращается, что предотвращает возможность повреждения поверхности коллектора щеточной арматурой. Щетки представляют собой прямоугольные бруски из композиции, выполненной на основе графита. В зависимости от состава, способа изготовления и физических свойств они имеют различную маркировку. Все марки объединяются в шесть основных групп: угольно-графитные, графитные, электрографитированные, медно-, бронзо- и серебряно-графитные. Для каждой машины следует применять только щетки такого типа и размера, которые выбраны заводом-изготовителем.

Щетки современных крупных машин выполняют разрезными в радиально-осевом направлении со специальной резиновой накладкой для выравнивания давления пальца *6* на обе половины щетки. Такое разделение щетки на две части обеспечивает лучшее ее прилегание к коллектору.

Для лучшего прохождения тока к щеткодержателю от щеток последние часто снабжают медными плетеными канатиками (шунтами) 7, один конец которых заделан в арматуру щетки, а другой присоединяют к корпусу щеткодержателя.

Щеточный аппарат укрепляют на подшипниковых щитах.

Контрольные вопросы

1. Почему возникает пульсация тока во внешней цепи и как ее уменьшить?
2. Что такое электрические градусы, каково их отличие от геометрических?
3. Где необходимо устанавливать щетки?
4. Каково назначение станины?
5. Почему сердечник якоря собирают из изолированных листов электротехнической стали?
6. Для чего делают продорожку коллектора?
7. Как устроен щеткодержатель? Какие бывают типы и конструкции щеток?

Глава 2. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

2.1. Основной магнитный поток и поток рассеяния. Индукция в воздушном зазоре

Магнитная цепь и методы ее расчета одинаковы для любых электрических машин постоянного или переменного тока. Разница между магнитными цепями машин и трансформаторов заключается лишь в том, что у первых есть воздушный зазор между статором и ротором, и конфигурация магнитной цепи более сложна.

Магнитный поток в электрической машине протекает по магнитной цепи так, как показано на рис. 2.1. Сколько бы ни было в машине полюсов, магнитная цепь всегда включает в себя два полюса N — S (одну пару) противоположной полярности. Но не весь магнитный поток проходит через зазор δ в якорь. Часть его замыкается по воздуху вокруг обмотки возбуждения и носит название *потока рассеяния* Φ_σ, в отличие от *основного магнитного потока* $\Phi_о$, входящего в якорь машины. Таким образом, весь поток полюса

$$\Phi_п = \Phi_о + \Phi_\sigma = \Phi_о (1 + \Phi_\sigma/\Phi_о) = k_\sigma \Phi_о. \qquad (2.1)$$

Коэффициент $k_\sigma = 1 + \Phi_\sigma/\Phi_о$ носит название *коэффи-*

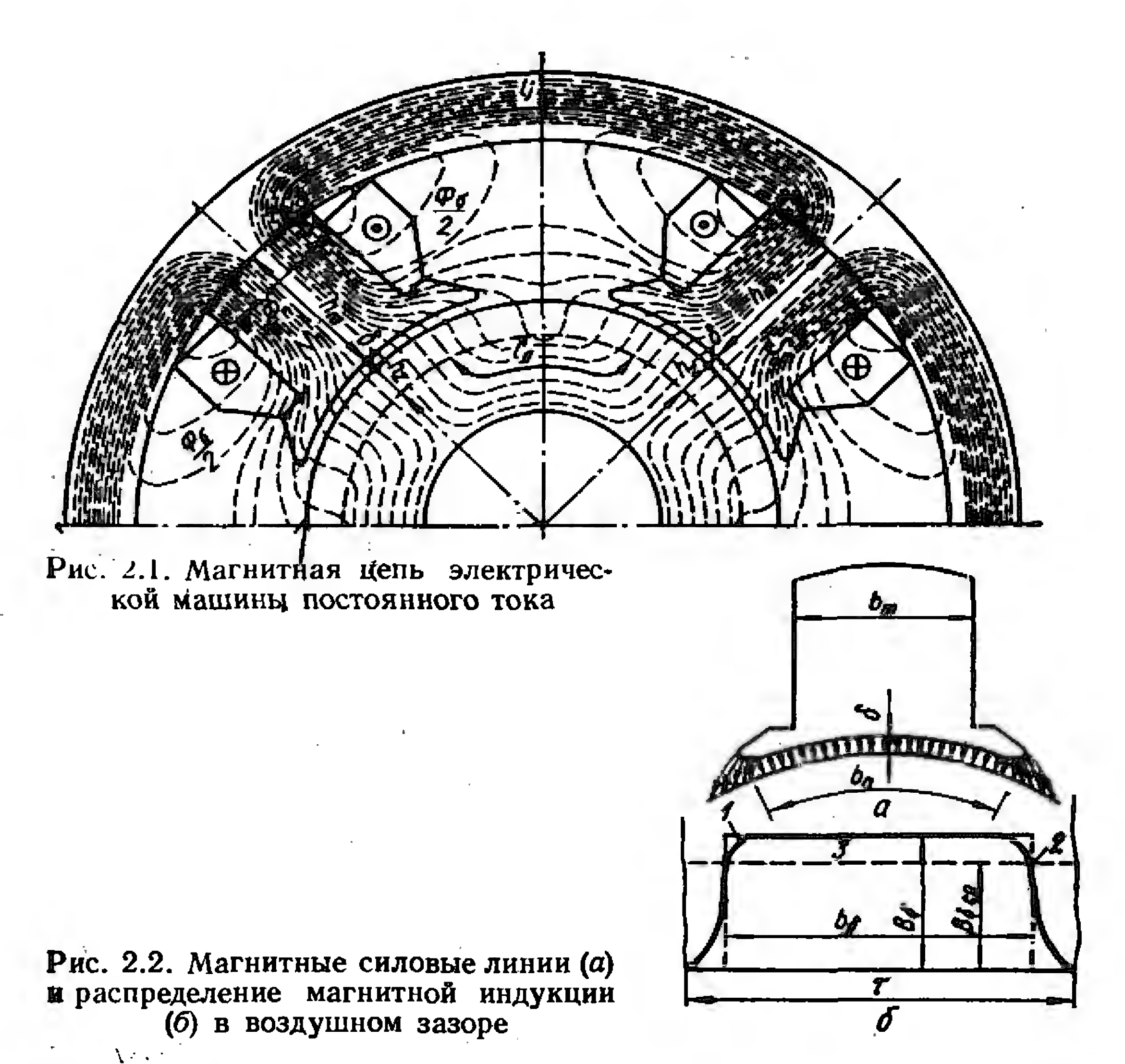


Рис. 2.1. Магнитная цепь электрической машины постоянного тока

Рис. 2.2. Магнитные силовые линии (*а*) и распределение магнитной индукции (*б*) в воздушном зазоре

циента рассеяния. Обычно в тяговых электрических машинах $k_\sigma = 1{,}12 \div 1{,}22$.

Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре на длине полюсного деления τ имеет сложную форму (кривая *1* на рис. 2.2, *б*). Для расчетных целей ее заменяют эквивалентным по площади прямоугольником *2*, что соответствует равенству потоков, ограниченных линиями *1* и *2*. Высоту прямоугольника принимают равной значению действительной индукции B_δ; тогда основание его, называемое *расчетной полюсной дугой*, будет b_δ.

В реальных машинах расчетная и действительная полюсные дуги приблизительно равны между собой, т. е. $b_\delta \approx b_п$. На длине полюсной дуги основной магнитный поток входит в якорь. Отношение $\alpha = b_\delta/\tau \approx b_п/\tau = 0{,}65 \div 0{,}72$ называется *коэффициентом полюсного перекрытия*.

2.2. Участки магнитной цепи. Принцип определения основной МДС

В основу расчета магнитной цепи положен закон полного тока

$$\Sigma H \Delta l = \Sigma i,$$

где H — напряженность магнитного поля; Δl — элемент длины магнитной линии; Σi — полный ток, охватываемый магнитной линией.

Магнитная цепь машины состоит из пяти последовательно соединенных участков, отличающихся друг от друга своими магнитопроводящими свойствами и имеющих различные длины пути для магнитного потока (см. рис. 2.1): 1) воздушного зазора δ; 2) зубцов якоря h_z; 3) тела якоря $l'_я$; 4) тела полюса h_m; 5) тела станины l_j.

Вследствие падения магнитного потенциала на каждом из участков для прохождения основного магнитного потока необходима определенная МДС $F_о$, которую можно определить, просуммировав МДС каждого из участков:

$$F_о = F_\delta + F_z + F_я + F_m + F_j. \quad (2.2)$$

МДС участка магнитной цепи равна произведению напряженности магнитного поля $H_{уч}$ и длины участка $l_{уч}$:

$$F_{уч} = H_{уч} l_{уч}. \quad (2.3)$$

Напряженность $H_{уч}$ и индукция $B_{уч}$ связаны между собой соотношением

$$B_{уч} = \mu_{уч} H_{уч} = \Phi_{уч}/S_{уч},$$

откуда

$$H_{уч} = \frac{\Phi_{уч}}{\mu_{уч} S_{уч}}, \quad (2.4)$$

где $\mu_{уч}$ — магнитная проницаемость материала, изменяющаяся на стальных участках с изменением индукции $B_{уч}$ (рис. 2.3), а $S_{уч}$ — площадь поперечного сечения участка. На участках из немагнитных материалов (медь, изоляция, воздух) магнитная проницаемость постоянна и равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Подставив (2.4) в (2.3), получим

$$F_{уч} = \frac{\Phi_{уч} l_{уч}}{\mu_{уч} S_{уч}}. \quad (2.5)$$

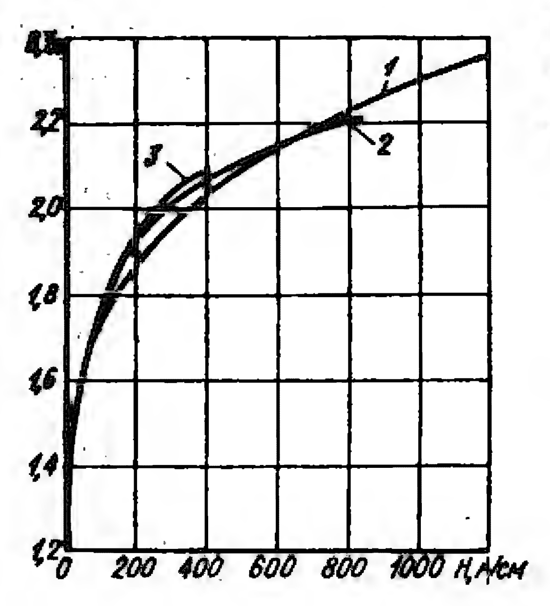
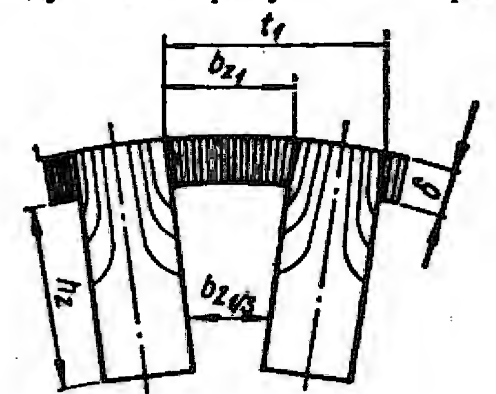


Рис. 2.3. Характеристики намагничивания:

1 — стали 2312; *2* — листовой стали толщиной 1,5 мм; *3* — стального литья

Рис. 2.4. Магнитные силовые линии в воздушном зазоре зубчатого якоря



Следовательно, основная МДС, рассчитанная на пару полюсов, равна

$$F_0 = \Phi_0 \frac{2\delta}{\mu_0 S_\delta} + \Phi_0 \frac{2h_z}{\mu_z S_z} + \frac{\Phi_0}{2} \frac{l'_я}{\mu_я S_я} +$$

$$+ k_\sigma \Phi_0 \frac{2h_m}{\mu_m S_m} + k_\sigma \frac{\Phi_0}{2} \frac{l_j}{\mu_j S_j}. \qquad (2.6)$$

Таким образом, разделив магнитный поток на площадь поперечного сечения участка, можно определить индукцию $B_{уч}$. Используя характеристику намагничивания для материала участка (см. рис. 2.3), находят напряженность $H_{уч}$, умножив которую на длину пути участка $l_{уч}$, получают МДС участка $F_{уч}$. С учетом (2.3) — (2.5) уравнение (2.6) принимает вид

$$F_0 = 2H_\delta \delta + 2H_z h_z + H_я l'_я + 2H_m l_m + H_j l_j. \qquad (2.7)$$

Расчеты МДС отдельных участков магнитной цепи машины при их принципиальной идентичности имеют некоторые особенности. Из-за зубчатого строения якоря средняя длина пути магнитного потока в воздушном зазоре δ' несколько больше, чем измеренный зазор δ (рис. 2.4):

$$\delta' = k_\delta \delta. \qquad (2.8)$$

Для определения коэффициента воздушного зазора можно использовать эмпирическую формулу

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z_1} + 10\delta}, \qquad (2.9)$$

где $t_1 = \pi D_я/z$ — шаг зубцов; z — число зубцов (пазов) якоря; b_{z_1} — ширина зубца по наружному диаметру якоря (см. рис. 2.4).

Если длина стального пакета якоря равна $l_я$, то

$$S_\delta = \alpha\tau l_я. \tag{2.10}$$

Ввиду клиновидной формы зубца индукция в его различных сечениях по высоте неодинакова. Поэтому в качестве расчетного принимают сечение на высоте $h_z/3$ от основания зубца, тогда

$$S_z = \frac{0{,}97 b_{z_{1/3}} z \alpha l_я}{2p}, \tag{2.11}$$

где коэффициентом заполнения пакета сталью 0,97 учитывают изоляцию одного листа пакета от другого.

При определении площади сечения тела якоря между дном паза и внутренним диаметром D_i учитывают наличие вентиляционных каналов: число их рядов $n_к$ и диаметр $d_к$. При этом

$$S_я = \frac{0{,}97 l_я (D_я - D_i - 2h_z - 4n_к d_к/3)}{2}. \tag{2.12}$$

Величины S_m и S_j найти легко.

Поскольку МДС определяется произведением тока в обмотке и ее числа витков, то, зная МДС $F_о$, приходящуюся на пару полюсов, можно рассчитывать число витков обмотки возбуждения одного полюса машины:

$$w_в = 0{,}5 F_о / I_в, \tag{2.13}$$

где $I_в$ — ток в обмотке возбуждения машины.

2.3. Магнитная характеристика и коэффициент насыщения

Если выполненный расчет магнитной цепи соответствует номинальному значению $\Phi_о$, то, задавшись рядом значений потока в интервале $(0{,}4 \div 1{,}2)\,\Phi_о$, можно получить зависимость $\Phi_о = f(F_о)$ или $\Phi_0 = f(I_в)$, которая называется *магнитной характеристикой машины* (рис. 2.5, сплошная линия). В начальной части магнитная характеристика имеет практически прямолинейный характер, так как при малых значениях потока $\Phi_о$ сталь машины не насыщена, обладает малым магнитным сопротивлением и МДС расходуется в основном на преодоление воздушного зазора.

Продолжив прямолинейную часть кривой (штрих-пунктир), получим зависимость $\Phi_о = f(F_\delta)$. Для номинального

значения $\Phi_о$ МДС F_δ определяется отрезком ab; следовательно, отрезок bc соответствует части основной МДС, необходимой для прохождения потока по стальным участкам цепи. Степень насыщения магнитной цепи характеризуется *коэффициентом насыщения*

$$k_{нс} = \frac{F_о}{F_\delta} = \frac{ac}{ab} = 1 + \frac{bc}{ab}, \qquad (2.14)$$

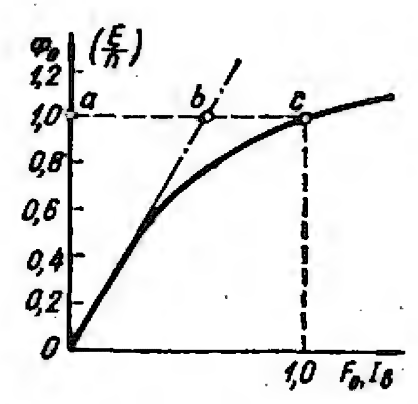


Рис. 2.5. Магнитная характеристика машины

который является важнейшим параметром машины. По значению $k_{нс}$ можно судить о некоторых технико-экономических показателях и регулировочных свойствах машины.

Согласно выражению (В.8), основной магнитный поток

$$\Phi_о = E/c_e n. \qquad (2.15)$$

Следовательно, зависимость $\Phi_о = f(I_в)$ является одновременно зависимостью $E/n = f(I_в)$. Значит, изменяя ток возбуждения $I_в$, можно изменять ЭДС или частоту вращения. Если генератор имеет постоянную частоту вращения n, то при изменении тока возбуждения изменится ЭДС и, согласно (В.10), напряжение $U_г$. Характер этого изменения определится магнитной характеристикой.

Слабонасыщенные машины обладают лучшими регулировочными свойствами, чем сильнонасыщенные. Но машины со слабонасыщенной магнитной цепью, имея бóльшие площади поперечного сечения участков цепи, больше по размерам, тяжелее и дороже.

Уменьшить насыщение магнитной цепи машины можно за счет увеличения воздушного зазора при сохранении высоких индукций в стали. Но при этом необходимо выполнить мощную обмотку возбуждения с большим расходом меди.

В зависимости от условий работы, для которых предназначена машина, ее магнитная цепь может быть: слабонасыщенной ($k_{нс} < 1,5$), средненасыщенной ($k_{нс} = 1,6 \div 1,8$) и сильнонасыщенной ($k_{нс} > 1,9$).

Для получения таких значений коэффициентов насыщения в машинах постоянного тока индукции на отдельных участках магнитной цепи должны находиться в пределах:

воздушный зазор B_δ, Тл	0,8—1,1
зубцы якоря $B_{z_{1/3}}$, Тл	2,1—2,4

тело якоря $B_я$, Тл		1,2—1,6
» полюса B_m, Тл		1,3—1,7
» станины B_j, Тл		1,1—1,4.

Контрольные вопросы и задача

1. Что называется магнитной цепью? Какие конструктивные элементы машин постоянного тока образуют магнитные цепи? Что такое основной магнитный поток?
2. На основании какого закона и в какой последовательности выполняется расчет магнитных цепей?
3. Что называется коэффициентом полюсного перекрытия? Как он определяется?
4. Основной магнитный поток в шестиполюсном тяговом двигателе электровоза $\Phi_0 = 0,12$ Вб; коэффициент полюсного перекрытия $\alpha = 0,72$; число пазов в якоре $z = 123$; расчетные ширина и высота зубца якоря $b_{z_{1/3}} = 0,01$ м и $h_z = 0,035$ м; длина пакета якоря $l_я = 0,38$ м. Чему равны: 1) индукция в зубцах якоря $B_{z_{1/3}}$; 2) МДС зубцов F_z (использовать характеристику на рис. 2.3)?

Глава 3. ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Устройство обмоток

Современные электрические машины выполняют в основном с зубчатыми барабанными якорями, в пазы которых укладывают *двухслойные* обмотки.

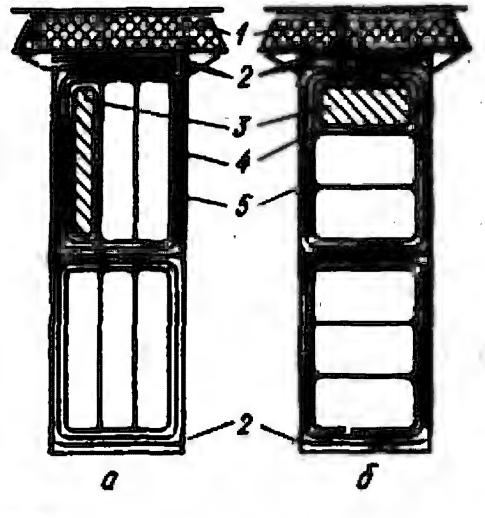
Основным элементом обмотки якоря является *секция*, которая состоит из одного или нескольких последовательно соединенных витков. В каждом пазу находится, как правило, несколько секций (рис. 3.1, *а*), изолированных общей корпусной изоляцией от стенок паза и образующих катушку якоря. В этом случае говорят, что каждому двухслойному *реальному* пазу соответствует несколько двухслойных *элементарных* пазов.

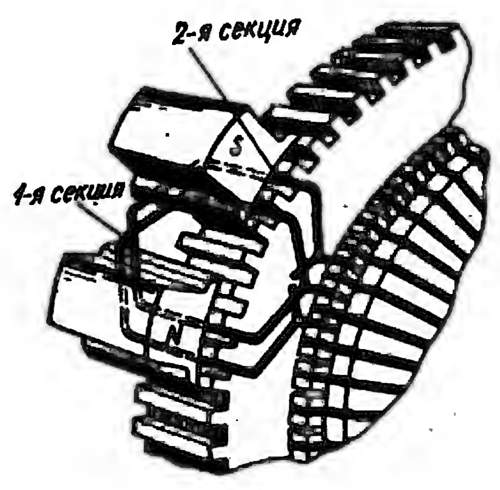
Секция якоря имеет две активные стороны — верхнюю и нижнюю. Переход из верхнего слоя в нижний выполняют с помощью *головки* в задней лобовой части секции. Концы передней лобовой части секции присоединяют (припаивают) к коллекторным пластинам (см. рис. 1.6), причем начало последующей секции подсоединяют к той же коллекторной пластине, что и конец предыдущей. Это создает непрерывность обмотки. Общее количество секций S всегда равно числу коллекторных пластин K и числу элементарных пазов $z_э$:

$$S = K = z_э = u_п z, \qquad (3.1)$$

Рис. 3.1. Расположение проводников в пазах якоря «на ребро» (*а*) и «плашмя» (*б*):

1 — клин; *2* — прокладки; *3* — витковая, *4* — корпусная, *5* — покровная изоляция





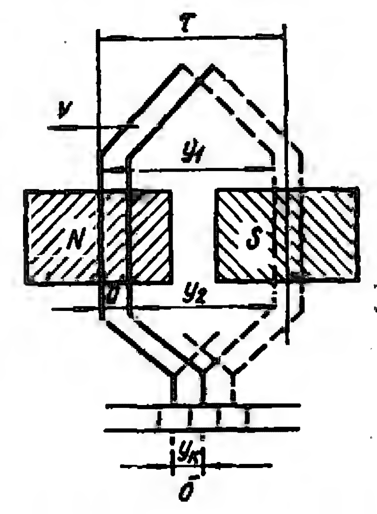


Рис. 3.2. Общий вид петлевой обмотки (*а*) и схема соединения ее секций (*б*)

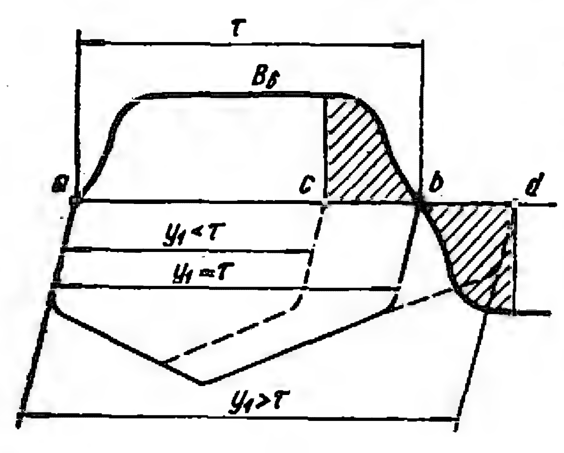


Рис. 3.3. Схема расположения диаметральной, укороченной и удлиненной секций в магнитном поле электрической машины

где $u_п$ — число коллекторных пластин или элементарных пазов, приходящихся на один реальный паз.

Поскольку каждый виток секции образован ее двумя сторонами (проводниками), то полное число проводников в якоре

$$N = 2Kw_c = 2Sw_c, \quad (3.1,а)$$

где w_c — число витков в секции.

В последние годы, особенно в тяговых электрических машинах, широкое распространение получила *многослойная* конструкция паза (рис. 3.1, *б*), в которой большее заполнение медью и лучшая отдача теплоты каждым проводником стенкам паза, хотя принципиального различия между пазами на рис. 3.1, *а* и *б* нет: второй можно получить, расположив проводники первого «плашмя»; у обоих $u_п = 3$, поэтому обмотка, выполненная конструктивно по рис. 3.1, *б*, также является двухслойной.

Наводимые в каждой из активных сторон секций ЭДС должны складываться; поэтому стороны секций располагают под полюсами разной полярности на расстоянии y_1, равном или приблизительно равном длине полюсного деления τ (рис. 3.2). Обмотки, у которых $y_1 = \tau$, т. е. стороны секций находятся под углом 180° эл. по отношению друг к другу, получили название *диаметральных,* в отличие от *хордовых,* где $y_1 \neq \tau$.

На рис. 3.3 показаны три секции, у которых: $y_1 = \tau$ (секция *ab*); $y_1 < \tau$ (секция *ac*) и $y_1 > \tau$ (секция *ad*). Контур диаметральной секции охватывает весь магнитный поток Φ_0, соответствующий площади, ограниченной кривой индукции в воздушном зазоре. Контур хордовой укороченной секции *ac* охватывает только часть этого потока; поэтому наводимая в ней ЭДС будет меньше, чем в секции *ab*, на величину, пропорциональную заштрихованной площади, соответствующей укорочению *bc*. Удлиненная секция *ad* получает отрицательное приращение потока, соответствующее заштрихованной площади на расстоянии *bd*. Если укорочение *bc* и удлинение *bd* равны между собой, то ЭДС в секциях *ac* и *ad* также будут равны; однако для изготовления удлиненной секции требуется больше меди и изоляции на выполнение ее лобовых частей. Поэтому на практике удлиненные обмотки не применяют.

Основным типом обмотки является укороченная ($y_1 < \tau$), и только у небольших машин можно встретить диаметральные обмотки. Необходимость укорочения обмоток будет обоснована в гл. 5.

3.2. Простая петлевая обмотка

Простой петлевой обмоткой называется такая, у которой начало и конец секции присоединены к рядом лежащим коллекторным пластинам, т. е. ее шаг по коллектору

$$y_к = 1. \tag{3.2}$$

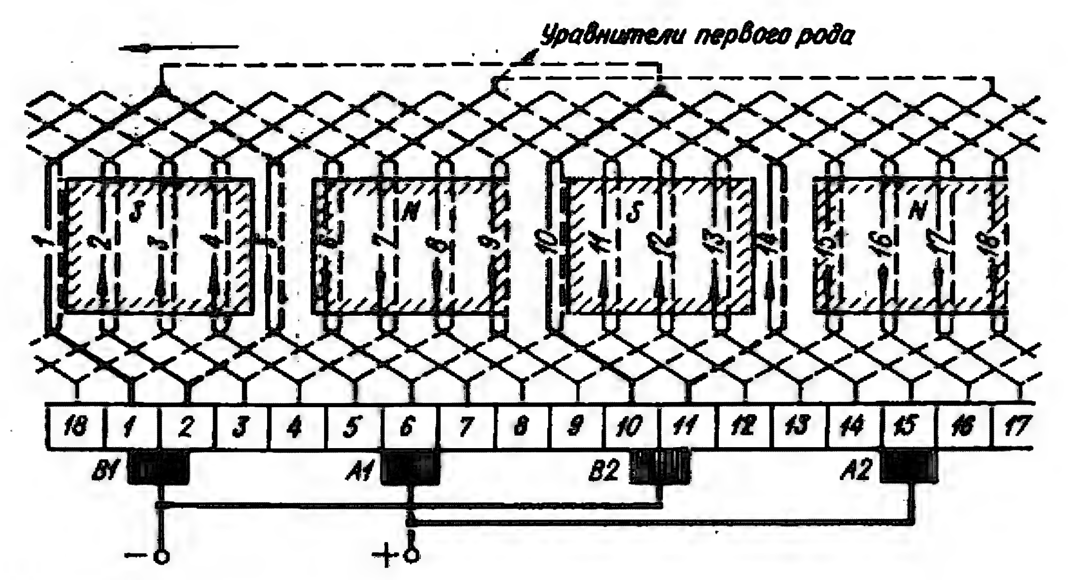


Рис. 3.4. Схема простой петлевой обмотки ($2p = 4$, $z = z_э = S = K = 18$, $y_1 = 4$, $y_2 = -3$, $y = y_к = 1$, $\varepsilon = 0{,}5$)

Свое название эта обмотка получила потому, что ее секция напоминает петлю (см. рис. 3.2).

Расстояние между активными сторонами одной секции, выраженное через число коллекторных пластин, называется *первым частичным шагом* y_1. Так как на длину одного полюсного деления приходится $K/(2p)$ коллекторных пластин, то у укороченной обмотки

$$y_1 = \frac{K}{2p} - \varepsilon, \tag{3.3}$$

где ε — величина укорочения. Очевидно, величина ε должна быть такой, чтобы значение шага y_1 было равно целому числу. Как правило, она минимальна. У диаметральной обмотки $\varepsilon = 0$.

Вторая секция сдвинута вправо от первой на шаг $y_к$. Расстояние между конечной стороной предыдущей секции и начальной стороной следующей называется *вторым частичным шагом* y_2. Его отсчет у петлевой обмотки идет справа налево (против отсчета y_1), поэтому y_2 является отрицательной величиной.

Результирующий шаг петлевой обмотки

$$y = y_1 + y_2 = y_к = 1, \tag{3.4}$$

тогда

$$y_2 = 1 - y_1. \tag{3.4,а}$$

Рассмотрим пример простой петлевой обмотки генератора, схема и основные данные которой приведены на рис. 3.4. Полагаем, что число элементарных пазов $z_э = z$,

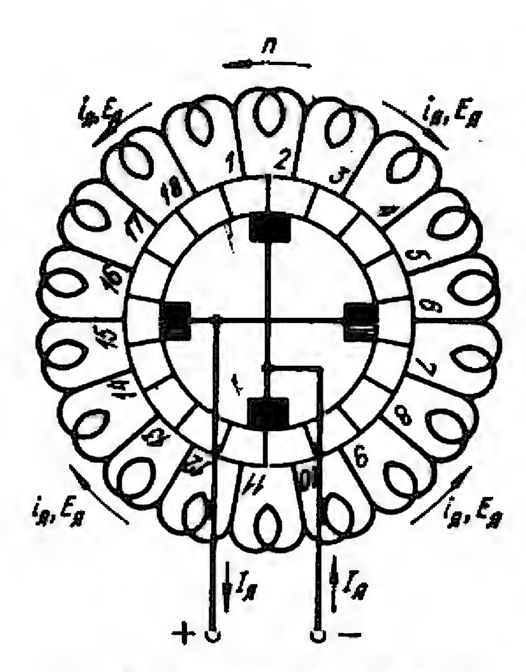


Рис. 3.5. Упрощенная схема простой петлевой обмотки

т. е. $u_п = 1$; $w_с = 1$. Щетки на коллекторе отстоят на одинаковом расстоянии друг от друга и установлены точно по оси полюсов, замыкая накоротко коллекторные пластины секций, стороны которых расположены симметрично относительно середины полюса, когда ЭДС в них приблизительно равна нулю (эти секции № 1 и 10 выделены на рисунке жирными линиями). Если величина укорочения $\varepsilon = 0$, то стороны этих секций лежат точно на геометрической нейтрали и их ЭДС точно равна нулю.

Так как секции № 1 и 10 закорочены щетками *B1* и *B2*, они не участвуют в создании ЭДС в обмотке. Остальные же 16 секций, распределенные равномерно между щетками, образуют четыре одинаковых параллельных ветви, в каждой из которых создается ЭДС $E_я$ четырьмя секциями. Верхние стороны секций каждой параллельной ветви находятся под одним полюсом, а нижние — под другим. Упрощенная схема простой петлевой обмотки, показанной на рис. 3.4, изображена на рис. 3.5, где каждый ее виток соответствует реальной секции обмотки.

Как видно из рисунка, ток якоря $I_я$ состоит из токов параллельных ветвей $i_я$ внутри обмотки, причем к каждой щетке подходит (или уходит) ток $2i_я$ двух параллельных ветвей. При вращении якоря секция переходит из одной параллельной ветви в другую, замыкаясь накоротко щеткой в момент перехода. Каждой паре полюсов соответствуют пара щеток и пара параллельных ветвей обмотки.

Из рассмотрения схем простой петлевой обмотки (рис. 3.4 и 3.5) следует, что у машины с числом полюсов $2p = 4$ число параллельных ветвей обмотки $2a = 4$. Но это число полюсов было выбрано в рассмотренном примере произвольно. Следовательно, в общем случае число пар параллельных ветвей простой петлевой обмотки равно числу пар полюсов, т. е.

$$a = p, \qquad (3.5)$$

а ток якоря

$$I_я = 2ai_я. \qquad (3.6)$$

Отметим, что ЭДС в одной параллельной ветви $E_я$ является также и ЭДС во всей обмотке E; число щеток на коллекторе машины с петлевой обмоткой всегда должно быть равно числу ее полюсов.

Пример расчета простой петлевой обмотки. Исходные данные (см. рис. 3.4): число полюсов машины $2p = 4$, число пазов $z = 18$, число коллекторных пластин $K = 18$, число витков в секции $w_с = 1$.

Поскольку $K = z_э = z$, то $u_п = 1$, т. е. в каждом реальном пазу находится один элементарный, состоящий их двух сторон (верхней и нижней) секций.

Согласно (3.3), первый частичный шаг $y_1 = \frac{18}{4} - \varepsilon$. Чтобы y_1 было равно целому числу, минимальная величина укорочения $\varepsilon = 0{,}5$; тогда $y_1 = 4$ (проводник, лежащий в первом пазу, соединяется лобовой частью с проводником пятого паза). Полное число проводников, согласно (3.1, *а*), $N = 2 \cdot 18 = 36$.

Поскольку $y_к = 1$, то из (3.4, *а*) второй частичный шаг $y_2 = 1 - 4 = -3$ (его отсчет на схеме идет, в отличие от первого частичного шага, не слева направо, а справа налево).

Нанесем на чертеж контуры полюсов, укажем (произвольно) их полярность, а также пронумеруем все пазы (см. рис. 3.4). Верхний проводник в пазу представлен сплошной, а нижний — штриховой линией. Условимся считать, что полюсы, контуры которых нанесены на чертеже, находятся над якорной обмоткой, т. е. магнитные силовые линии, например «северного» полюса, входят в плоскость чертежа.

Затем необходимо изобразить коллекторные пластины и присоединить верхний проводник первого паза к коллекторной пластине, которой присвоим № 1. Этот проводник задней лобовой частью соединяется с нижним проводником пятого паза. Образовалась первая секция; ее конец подсоединен к коллекторной пластине № 2, от которой начинается вторая секция (верхний проводник второго паза). Дальнейшее построение схемы выполняется аналогично. Последняя секция (18-я) должна замкнуть обмотку, т. е. ее конец (нижний проводник четвертого паза) подсоединяется к коллекторной пластине № 1.

Далее следует изобразить на схеме щетки. Расстояние между щетками противоположной полярности *A* и *B* должно быть равно $K/(2p) = {}^{18}/_{4} = 4{,}5$ коллекторных пластин; щетки устанавливаются точно по оси полюсов. Поскольку обмотка выполняется для машины с $2p = 4$, щеток должно быть четыре. Полярность щеток определяют исходя из предположения, что машина работает в генераторном режиме, а ее якорь вращается в направлении стрелки. Воспользовавшись правилом правой руки, находят направление ЭДС (тока), наведенной в секциях, и указывают его стрелками. В итоге оказалось, что щетки *A1* и *A2*, от которых ток отводится во внешнюю цепь, являются положительными, а щетки *B1* и *B2* — отрицательными. Щетки одинаковой полярности присоединяют параллельно к соответствующим выводам.

Расстановку уравнительных соединений первого рода следует выполнить, пользуясь выражением (3.18).

3.3. Простая волновая обмотка

Секции волновой обмотки, присоединенные к коллектору, напоминают волну; отсюда и название обмотки — *волновая* (рис. 3.6).

Условие ее выполнения таково: начав с первой коллекторной пластины, нужно совершить один обход якоря, уложив при этом p секций; конец p-й секции следует присоединить к пластине, расположенной рядом с первой. На практике большей частью встречаются неперекрещивающиеся обмотки, у которых обход якоря заканчивается на пластине, лежащей слева от первой, т. е. на K-й пластине. В такой обмотке секции при укладке последовательно сдвигаются на одно коллекторное деление, а последняя секция замкнута через первую коллекторную пластину с началом обмотки.

В соответствии со сказанным, за один обход якоря происходит перемещение на $K - 1$ коллекторных пластин, но так как при этом укладывается p секций, то $py_к = K - 1$, откуда

$$y_к = \frac{K-1}{p}. \qquad (3.7)$$

Поскольку $y_к = y$ дробным числом быть не может, число K должно быть строго согласовано с p.

Второй частичный шаг волновой обмотки отсчитывается в том же направлении, что и первый; поэтому здесь y_2 — положительная величина: $y_2 = y - y_1 = y_к - y_1$.

Ознакомимся со свойствами простой волновой обмотки на примере схемы, показанной на рис. 3.7:

$$y_к = y = \frac{K-1}{p} = \frac{17-1}{2} = 8;$$

$$y_1 = \frac{K}{2p} - \varepsilon = \frac{17}{4} - \frac{1}{4} = 4.$$

Секции № 1, 5, 9, 10 и 14, выделенные на рис. 3.7 жирными линиями, в отличие от секций петлевой обмотки, замыкаются накоротко через две щетки одной полярности и соединительные провода между ними.

Проследив на схеме обмотки за направлением ЭДС, можно увидеть, что оно сохраняется неизменным во всех сторонах секций, расположенных в пределах полюсного деления, т. е. в $K/(2p) = S/(2p)$ сторонах секций. За один обход якоря при намотке укладывается (соединяется последовательно) $2p$ сторон секций; следовательно, количество

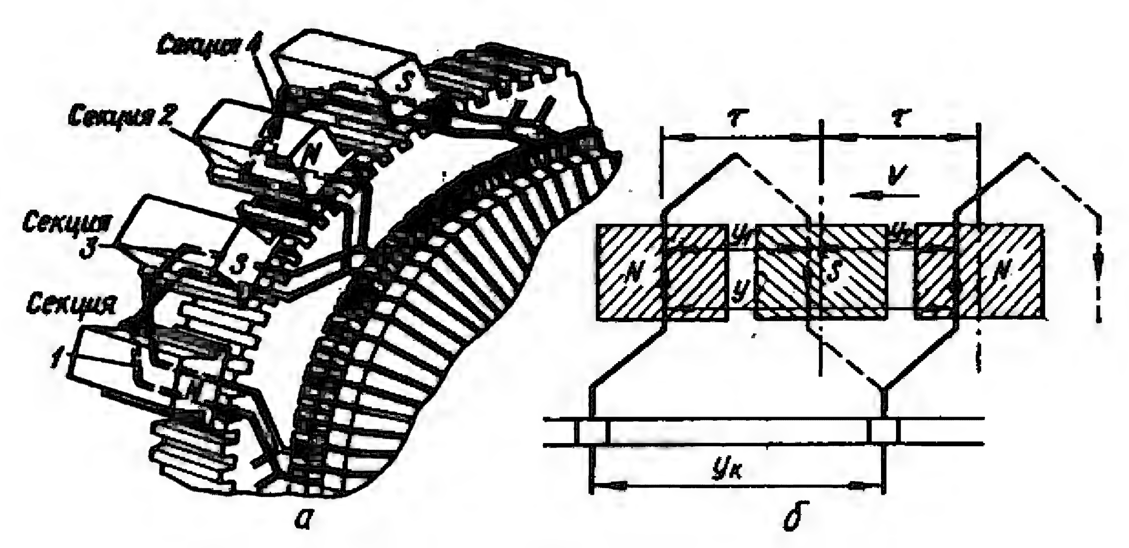


Рис. 3.6. Общий вид волновой обмотки (*а*) и схема соединения ее секций (*б*)

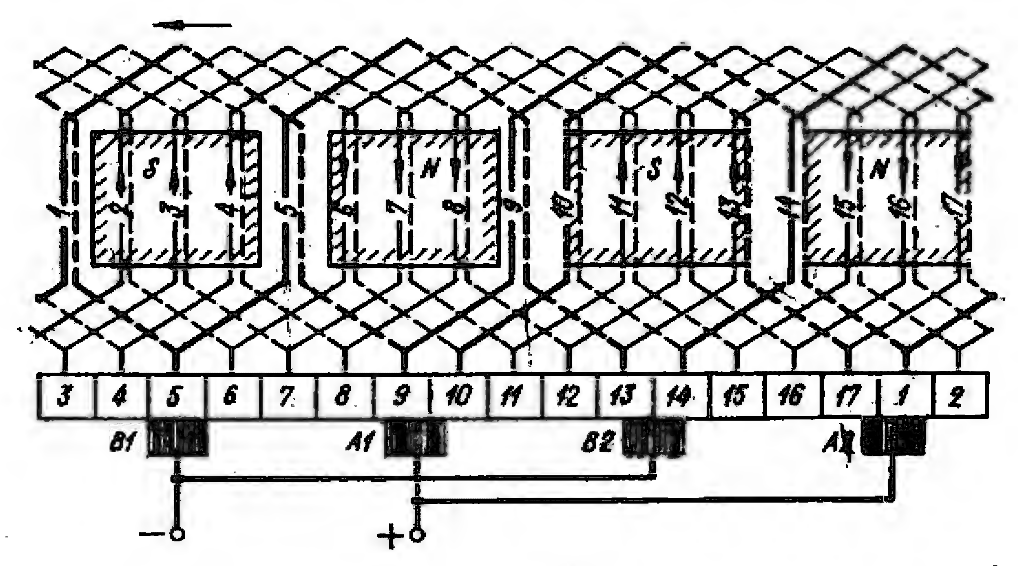


Рис. 3.7. Схема простой волновой обмотки ($2p = 4$, $z = z_э = S = K = 17$, $y_1 = y_2 = 4$, $y_к = 8$)

секций в одной параллельной ветви $S_в = p\frac{S}{2p} = S/2$, а число параллельных ветвей обмотки не зависит от числа полюсов машины и равно $2a = S/S_в = 2$, т. е.

$$a = 1. \tag{3.9}$$

ЭДС в якоре, как и в петлевой обмотке, определяется ЭДС в одной параллельной ветви, а ток якоря

$$I_я = 2i_я. \tag{3.10}$$

На коллекторе якоря с волновой обмоткой можно установить только две щетки, например *A1* и *B1* (см. рис. 3.7), так как все щетки данной полярности соединены коротко-

замкнутыми секциями между собой. Эти две щетки примут весь ток, а короткозамкнутых секций не будет. Однако для сохранения плотности тока под щетками при этом потребуется удлинить вдвое остальные щетки, что повлечет за собой увеличение осевой длины коллектора.

Кроме того, при неполном числе щеток возможна некоторая несимметрия параллельных ветвей обмотки, у которых разное число секций $K/(2a)$. Поэтому обычно ставят полный комплект $(2p)$ щеток, имея в виду, что в случае выхода из строя, например, одного щеткодержателя в машине, можно продолжить ее работу с неполным числом щеток, уменьшив при этом токовую нагрузку до значения, допустимого по плотности тока для оставшихся щеток.

3.4. Сложные обмотки

Сложные, или *многоходовые*, обмотки можно рассматривать как сочетание нескольких ($m = 2, 3, \ldots$) простых обмоток. Число параллельных ветвей в таких обмотках соответственно в m раз больше числа ветвей в простых обмотках.

Сложная петлевая обмотка. Число пар параллельных ветвей в такой обмотке

$$a = mp, \tag{3.11}$$

а шаг по коллектору

$$y_к = m. \tag{3.12}$$

На рис. 3.8 изображен элемент обмотки при $m = 2$.

Если машина имеет четное число коллекторных пластин, то такая обмотка представляет собой совокупность двух отдельных простых обмоток, совмещенных на якоре и работающих параллельно. На рис. 3.8, чтобы подчеркнуть самостоятельность обеих обмоток, они показаны по обе стороны от коллектора. Одна обмотка замыкается только по нечетным, а другая — по четным пластинам. Число щеток остается равным числу полюсов $2p$, но ширина каждой щетки должна быть увеличена, чтобы обе обмотки могли работать одно-

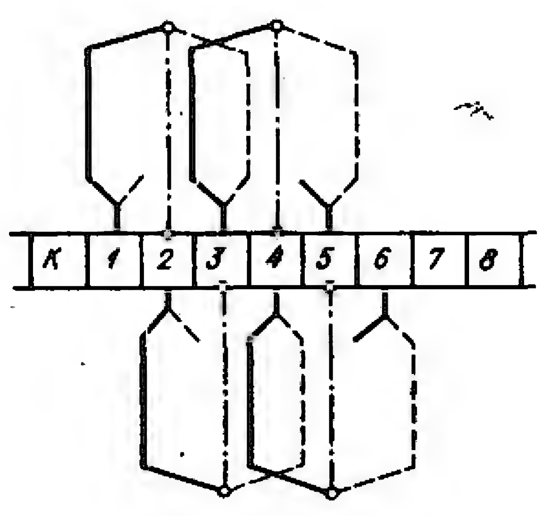


Рис. 3.8. Схема сложной петлевой обмотки с уравнителями третьего рода

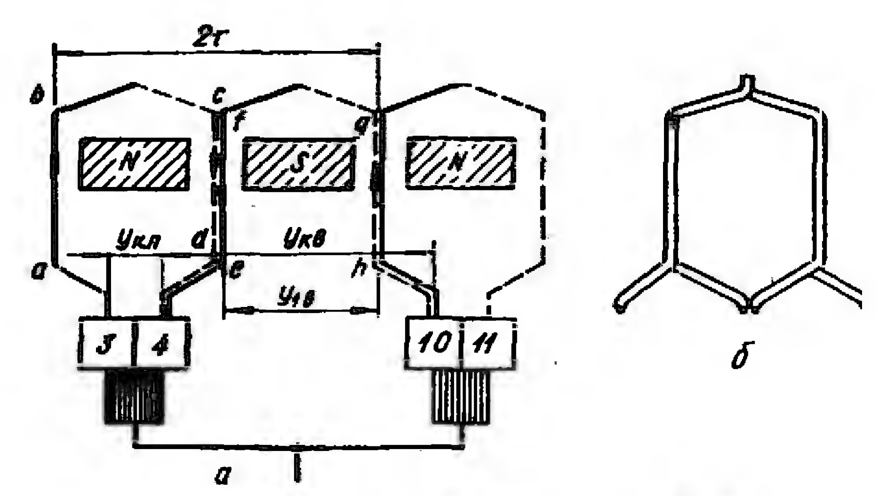


Рис. 3.9. Схема «лягушечьей» обмотки (*а*) и форма ее якорной катушки (*б*)

временно. Рассмотренная обмотка называется *двухходовой двукратнозамкнутой*.

Если число коллекторных пластин в машине нечетное, то, закончив первый обход коллектора на K-й пластине и не прерывая намотки, выполним второй обход по четным пластинам. В итоге получим обмотку, называемую *двухходовой однократнозамкнутой*.

Сложная волновая обмотка. Если, выполняя волновую обмотку, после одного обхода коллектора прийти к пластине, отстоящей от исходной на m делений, то можно получить m самостоятельных волновых обмоток, которые образуют одну сложную волновую. В ней шаг по коллектору

$$y_k = \frac{K - m}{p}, \tag{3.13}$$

а число пар параллельных ветвей

$$a = m. \tag{3.14}$$

Комбинированная («лягушечья») обмотка. Представляет собой комбинацию простой петлевой и сложной волновой обмоток, общая секция которых напоминает лягушку (рис. 3.9). Обе обмотки присоединяются к одному и тому же коллектору, лежат в одних пазах и состоят из одинакового числа секций. Для равенства ЭДС в параллельных ветвях, образуемых петлевой и волновой обмотками, число параллельных ветвей их должно быть одинаково. Поэтому если у петлевой обмотки $a_п = p$, то волновая обмотка должна иметь число ходов $m_в = p$; тогда, согласно выражению (3.14), $a_п = a_в$. Шаг по коллектору должен соответствовать результирующему, т. е.

$$y_{к.п} + y_{к.в} = K/p.$$

3.5. Условия симметрии обмоток

Каждая пара параллельных ветвей обмотки образует как бы простейшую машину, работающую параллельно с другими. Следовательно, ЭДС в каждой паре параллельных ветвей должны быть равны между собой, что достигается при выполнении следующих условий:

1) каждая пара ветвей должна быть образована из одинакового числа секций, т. е.

$$S/a = K/a = \text{ц. ч. (целое число)}; \qquad (3.15)$$

2) параллельные ветви должны размещаться в одинаковом числе пазов, т. е.

$$z/a = \text{ц. ч.}; \qquad (3.16)$$

3) параллельные ветви должны симметрично располагаться в магнитном поле полюсов, т. е.

$$2p/a = \text{ц. ч.} \qquad (3.17)$$

Как видно, из сложных петлевых обмоток условиям симметрии отвечает только двухходовая двукратнозамкнутая. Все остальные обмотки, у которых $m > 2$, являются несимметричными и применяются лишь в исключительных случаях.

3.6. Уравнительные соединения

Теоретически при симметричной обмотке и равенстве магнитных потоков всех полюсов ЭДС во всех ветвях обмотки должны быть одинаковы, а ветви — равномерно загружены токами. Опыт показывает, однако, что по целому ряду причин возникает асимметрия обмотки: воздушные зазоры под полюсами из-за неточности сборки или естественного прогиба вала машины получаются разными, щетки смещаются на коллекторе, материал магнитопровода станины или сердечников полюсов неоднороден и т. д.

Неравенство ЭДС в отдельных ветвях приводит к появлению внутри обмотки уравнительных токов, протекающих через щетку от точек с бóльшим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом.

Уравнители первого рода. Для примера рассмотрим обмотку, показанную на рис. 3.4 и 3.5. Ее секции № 1 и 10, которые берут начало у пластин таких же номеров, теоретически должны иметь равный потенциал. Если по причинам, указанным выше, пластина № 10 будет иметь больший

потенциал, от нее к пластине № 1 потечет уравнительный ток, добавочно нагружающий обмотку и щетки.

Так как сопротивление цепи для уравнительного тока невелико, то даже при небольшой разности потенциалов уравнительный ток может достигнуть большого значения. Необходимо отвести уравнительные токи по иному, независимому пути. Для этих целей служат уравнители, соединяющие внутри петлевой обмотки равнопотенциальные точки (см. рис. 3.4) и получившие название *уравнителей первого рода.*

Расстояние между равнопотенциальными точками определяет шаг уравнительных соединений

$$y_{\text{ур}} = K/a = K/p. \tag{3.18}$$

Уравнители можно располагать либо на стороне коллектора, соединяя непосредственно коллекторные пластины, либо со стороны задних лобовых частей. Первое по многим соображениям является предпочтительным.

Теоретически машину следует снабдить полным числом уравнителей, но практически этого никогда не делают. Опыт показывает, что достаточно иметь один, а у крупных машин с тяжелыми условиями работы — два уравнителя на один реальный паз. Площадь поперечного сечения уравнительного провода берут равной примерно 25 % площади поперечного сечения провода обмотки якоря.

Протекающие уравнительные токи, поскольку это токи якоря, являются переменными и по закону Ленца создают магнитное поле такого направления, чтобы сгладить несимметрию основного поля машины, под действием которой они возникли, что, в свою очередь, способствует ослаблению уравнительных токов.

У простых волновых обмоток ($a = 1$) в каждую параллельную ветвь входят секции, стороны которых расположены под всеми полюсами, поэтому неравенство потоков отдельных полюсов не вызывает неравенства ЭДС в параллельных ветвях. Следовательно, эти обмотки не нуждаются в уравнительных соединениях.

Уравнители второго рода. Сложные обмотки, имеющие число пар параллельных ветвей $a > 1$, представляют собой фактически несколько простых обмоток. И если даже полное равенство ЭДС во всех ветвях такой обмотки обеспечено, все же в результате нестабильности сопротивления контакта щетка — коллектор токи между отдельными ходами обмотки могут распределяться неравномерно, вследствие чего равномерное распределение потенциала по коллектору нарушается.

Чтобы избежать этого, соединяют уравнителями такие точки разных ходов сложной (петлевой или волновой) обмотки, которые теоретически должны быть равнопотенциальными. Эти уравнители получили название *уравнителей второго рода*. Их задача — выравнивать несимметричное распределение напряжения по коллектору.

Сложные петлевые обмотки, таким образом, должны иметь оба вида уравнителей: первого рода — в каждом ходе и второго рода — между ходами.

Уравнители третьего рода. Задача этих уравнителей, применяющихся в петлевых двухходовых обмотках, сводится к тому, чтобы при вращении коллектора щетка закорачивала сразу не всю секцию обмотки, а сначала одну ее половину, и затем другую. Для этого середину секции соединяют с равнопотенциальной точкой — коллекторной пластиной, расположенной между концами секции (штрихпунктирные линии на рис. 3.8).

Уравнители третьего рода значительно облегчают работу щеток, так как индуктивность закорачиваемого или разрываемого контура уменьшается вдвое (см. гл. 5). В сложной петлевой обмотке, показанной на рис. 3.8, уравнители третьего рода одновременно играют роль уравнителей второго рода. Установка их полного числа, связанная с соединением головок задних лобовых частей с коллекторными пластинами, чрезвычайно затруднена.

3.7. ЭДС и электромагнитный момент

ЭДС. В п. 3.2 было установлено, что ЭДС во всей обмотке якоря равна ЭДС в одной его параллельной ветви: $E = E_я$. Число активных проводников обмотки в одной параллельной ветви равно $N/(2a)$. Следовательно, для вычисления $E_я$ необходимо просуммировать ЭДС, наводимую во всех проводниках, которые составляют ветвь обмотки:

$$E_я = e_1 + e_2 + e_3 + \cdots + e_{N/(2a)} = \sum_{1}^{N/(2a)} e_x. \qquad (3.19)$$

ЭДС в проводнике зависит от индукции B_{δ_x} в том месте воздушного зазора, где находится проводник:

$$e_x = B_{\delta_x} l_я v. \qquad (3.20)$$

Согласно рис. 2.2, условие равенства площадей, ограниченных линиями *1*, *2* и *3*: $\alpha\tau B_\delta = \tau B_{\delta_{ср}}$, где $B_{\delta_{ср}}$ — среднее значение индукции на протяжении полюсного деления τ.

При достаточно большом числе проводников под полюсом (см. п. 1.1) можно считать, что все проводники пересекаются полем индукцией

$$B_{\delta_{ср}} = \alpha B_\delta = \Phi_о/\tau l_я. \quad (3.21)$$

С учетом (3.20) и (3.21) уравнение (3.19) принимает вид

$$E_я = \frac{N}{2a} \frac{\Phi_о}{\tau l_я} l_я v. \quad (3.22)$$

Длина полюсного деления

$$\tau = \pi D_я/(2p). \quad (3.23)$$

Подставив теперь в (3.22) значения v из (В.7) и τ из (3.23), после преобразования получим

$$E_я = pnN\Phi_о/a = E. \quad (3.24)$$

Объединив все постоянные в (3.24) и обозначив $c_e = pN/a$, получим

$$E = c_e n\Phi_о. \quad (3.25)$$

На значение ЭДС машины, кроме укорочения или удлинения обмотки (см. рис. 3.3), оказывает влияние и положение щеток: если они расположены на оси полюсов, т. е. контактируют со сторонами секций, находящихся на линии геометрической нейтрали, то ЭДС наибольшая, поскольку во всех секциях каждой параллельной ветви обмотки ЭДС имеет одинаковое направление. При повороте щеток на некоторый угол α от осей полюсов, в параллельных ветвях окажутся секции с противоположным направлением ЭДС, поэтому значение $E_я$ уменьшится и будет

$$E_я = E = c_e n\Phi_о \cos\alpha. \quad (3.26)$$

Электромагнитный момент. Если обозначить через $F_{рез}$ результирующую электромагнитную силу, возникающую в результате взаимодействия магнитного потока с током якоря, то электромагнитный момент, действующий на якорь с током $I_я$,

$$M_{эм} = 0{,}5F_{рез}D_я. \quad (3.27)$$

Если индукция $B_{\delta_{ср}}$, ток в проводнике $i_я$ и длина проводника (якоря) $l_я$, то, согласно (В.4), на каждый проводник действует сила $f_{ср} = B_{\delta_{ср}} l_я i_я$ и тогда

$$F_{рез} = Nf_{ср} = NB_{\delta_{ср}} l_я i_я. \quad (3.28)$$

Подставив теперь (3.28) в (3.27), с учетом (3.6) и (3.21) получим

$$M_{эм} = 0{,}5N \frac{\Phi_0}{\tau l_я} l_я \frac{I_я}{2a} D_я = c_м \Phi_0 I_я, \qquad (3.29)$$

где $c_м = \frac{ND_я}{4a\tau} = \frac{pN}{2\pi a}$ — постоянная.

Электромагнитный момент при работе машины в двигательном режиме является вращающимся, а при генераторном режиме — тормозным. Электромагнитная мощность определяется по формулам (В.16) — (В.18).

Как видно, общие выражения для ЭДС и электромагнитного момента (3.25) и (3.29) машины принципиально ничем не отличаются от ранее полученных выражений (В.8) и (В.12) для простейшей машины с якорной обмоткой в виде одного витка, вращающегося в магнитном поле.

3.8. Сопоставление обмоток различных типов

При проектировании электрических машин приходится считаться с необходимостью выбора рациональных размеров сечения проводников якоря, щеток и коллекторных пластин.

Практикой электромашиностроения установлено, что ток в параллельной ветви больших машин должен быть ограничен значением $i_я = 300 \div 350$ А. В тяговых машинах обычно $i_я < 200$ А. По условиям изготовления коллекторное деление не может быть менее 4 мм, т. е.

$$\beta_к = \pi D_к / K \geqslant 4 \text{ мм}, \qquad (3.30)$$

где $D_к$ — диаметр коллектора.

Чем выше напряжение машины, тем при данной мощности меньше ее ток и тем больше, согласно (3.24), должно быть активных проводников N и, как следствие,— коллекторных пластин K, поэтому в таких машинах применяют обмотку с $a = 1$, т. е. простую волновую. Ее преимущество перед другими типами обмоток — отсутствие уравнительных соединений.

При повышении тока машины возникает необходимость разделения его на большее число параллельных ветвей. Поэтому в машинах средней мощности низкого напряжения (100—300 кВт, 200—600 В) и большой мощности высокого напряжения (500—1000 кВт, 750—1500 В) применяют простые петлевые обмотки.

Сложные петлевые обмотки используют в мощных машинах пониженного или низкого напряжения (более

1200 кВт и менее 750 В), когда необходимо увеличить число параллельных ветвей якоря, а число полюсов сохранить неизменным. Сложные волновые обмотки применяют сравнительно редко в машинах средней мощности повышенного напряжения.

Электровозные тяговые двигатели мощностью до 450 кВт при напряжении 1500 В имеют простые волновые обмотки, а низковольтные тяговые двигатели тепловозов и их генераторы — простые петлевые обмотки. В мощных электровозных тяговых двигателях (более 500 кВт) используют петлевые обмотки.

«Лягушечья» обмотка не требует уравнительных соединений: секции сложной волновой обмотки играют у нее роль уравнителей первого рода для петлевой обмотки, а секции петлевой — являются уравнителями второго рода для сложной волновой (см. рис. 3.9). Считалось также, что она менее склонна к искрению и дугообразованию на коллекторе. Поэтому, несмотря на известные трудности ее изготовления, худшее заполнение паза, повышенный расход изоляционных материалов и более высокие рабочие температуры, «лягушечья» обмотка широко применялась в мощных электрических машинах.

Приведенные всесторонние исследования, однако, показали, что «лягушечья» обмотка не имеет преимуществ перед простой петлевой, уравнительные соединения первого рода в которой легко выполнить. При этом стоимость материалов простой петлевой обмотки с уравнителями не превышает стоимости эквивалентной «лягушечьей».

Контрольные вопросы и задачи

1. Что такое секция якоря? Как связаны между собой количества секций и коллекторных пластин в машине постоянного тока?
2. Какими параметрами характеризуется обмотка якоря?
3. В чем принципиальное отличие между простыми петлевой и волновой обмотками?
4. В чем отличие сложных обмоток от простых?
5. Какие бывают уравнительные соединения и где они применяются?
6. Якорь четырехполюсной машины постоянного тока имеет простую петлевую обмотку с числом активных сторон секций $N = 28$ и числом витков в секции $w_с = 1$. Определить шаги обмотки, число коллекторных пластин, вычертить ее развернутую схему и расставить щетки (аналогично рис. 3.4). Чему равен ток параллельной ветви, если ток якоря $I_я = 40$ А? Указать эквипотенциальные точки и соединить их уравнителями.
7. Выполнить то же, что и в предыдущей задаче, для простой волновой обмотки с $N = 30$. Почему в этой обмотке не требуется применение уравнителей?

8. Пользуясь данными задачи 4 к гл. 2, определить ЭДС E и напряжение U тягового двигателя, если в якоре его уложена простая петлевая обмотка с числом активных сторон секций $N = 738$, общим сопротивлением $R_я = 0{,}012$ Ом; частота вращения $n = 11$ об/с, а ток якоря $I_я = 1000$ А. Каковы ток в параллельной ветви и ток в одном щеткодержателе?
9. Как изменится ЭДС машины, если щетки сдвинуть с осей полюсов на угол $\alpha = 18°$?
10. Какими соображениями следует руководствоваться при выборе типа обмотки?
11. У четырехполюсного двигателя постоянного тока с волновой обмоткой число пазов якоря $z = 25$, число витков в секции $w_с = 4$, число элементарных пазов в одном реальном $u_п = 3$, магнитный поток $\Phi = 0{,}65 \cdot 10^{-2}$ Вб, ток якоря $I_я = 27$ А, частота вращения $n = 25$ об/с. Определить вращающий электромагнитный момент и электромагнитную мощность.
Пояснение: при решении задачи следует воспользоваться формулами (3.1), (3.1а), (3.24), (3.29) и (В.18). Все величины выражаются в единицах СИ.

Глава 4. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. Магнитное поле машины при нагрузке. Поперечная и продольная реакции якоря

Когда машина работает вхолостую, магнитное поле индуктора симметрично относительно оси ее полюсов. Картина этого поля в двухполюсной машине показана на рис. 4.1, *а*.

Отключим теперь обмотку возбуждения, а через якорь, щетки которого установлены условно на линии геометрической нейтрали *1—1* (т. е. замыкают секции, находящиеся на этой линии, как показано на рис. 3.4), пропустим ток. Поле, создаваемое данным током, будет симметрично относительно линии геометрической нейтрали (рис. 4.1, *б*). Следовательно, якорь, по обмотке которого протекает ток, является *электромагнитом,* причем ось его перпендикулярна к оси главных полюсов.

В условиях реальной нагрузки поля индуктора и якоря образуют результирующее поле, которое можно получить наложением обоих полей, показанных на рис. 4.1, *а* и *б*. Характер этого поля представлен на рис. 4.1, *в*, где стрелками указаны направления вращения якоря в режиме генератора (Г) и двигателя (Д).

Воздействие поля якоря на поле индуктора называется *реакцией якоря.* При установке щеток условно на линии геометрической нейтрали *1—1* (см. рис. 4.1) имеет место *поперечная* реакция якоря, так как магнитный поток якоря направлен поперек поля главных полюсов.

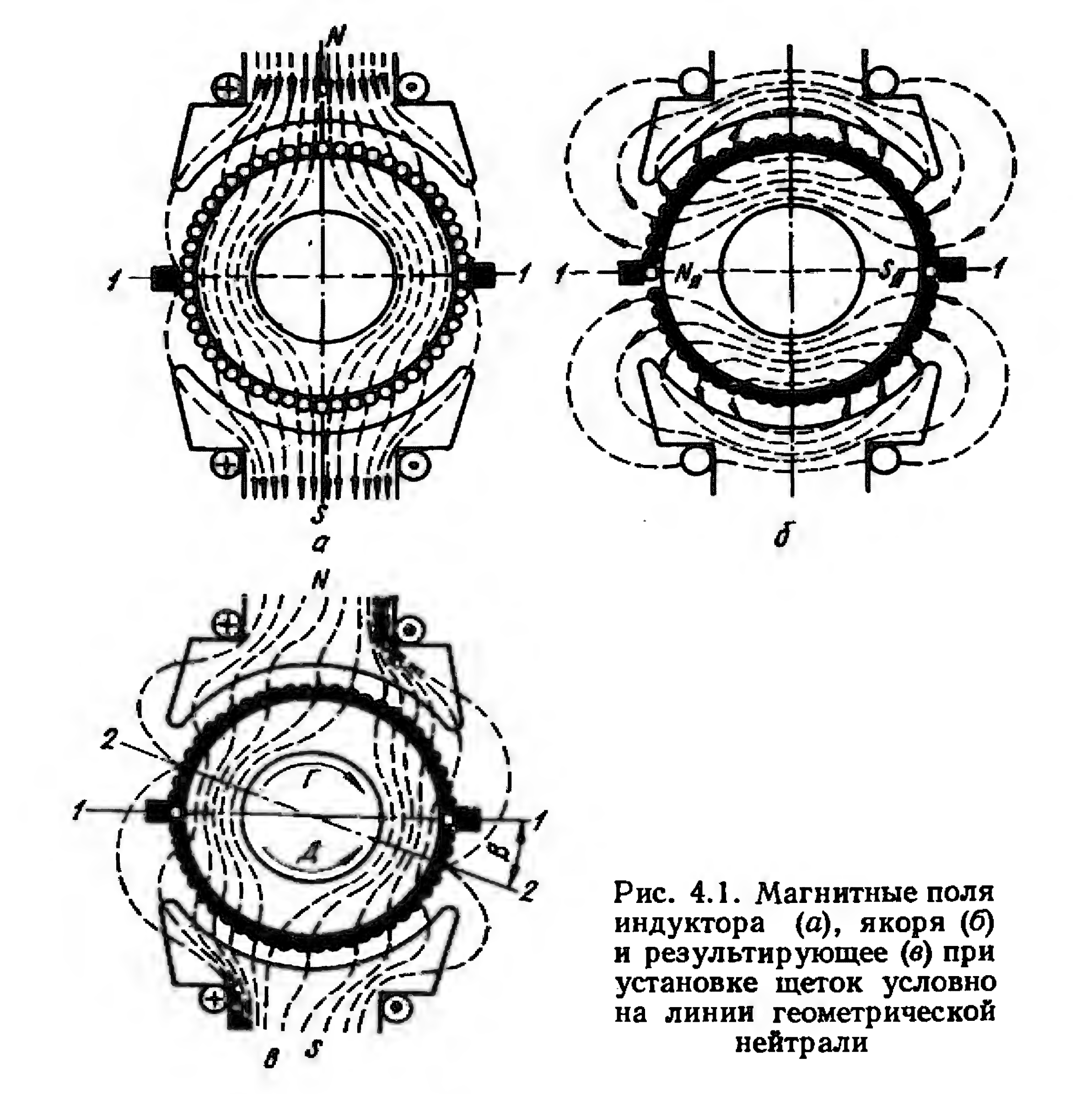


Рис. 4.1. Магнитные поля индуктора (*а*), якоря (*б*) и результирующее (*в*) при установке щеток условно на линии геометрической нейтрали

Как видно из рис. 4.1, *в*, поперечная реакция якоря ослабляет поле индуктора под одним краем полюса и усиливает под другим. Вследствие этого ось результирующего поля *2—2*, называемая *линией физической нейтрали*, поворачивается на угол β в генераторе по направлению вращения якоря, а в двигателе — наоборот. Ее положение на плоскости чертежа непостоянно и зависит от значения реакции якоря, т. е. угол β увеличивается или уменьшается вместе с током якоря.

Если щетки на рис. 4.1, *б* мысленно повернуть на 90°, то ось поля якоря совпадает с осью полюсов. В этом случае будет иметь место *продольная* реакция якоря. Она может быть намагничивающей, если щетки на рис. 4.1, *б* повернуть против хода часовой стрелки, или размагничивающей — при повороте щеток в обратную сторону.

Индуцируемая при этом ЭДС на щетках машины будет равна нулю, поэтому практически такой случай является нереальным. Однако если в результате неточной сборки или по другим причинам щетки будут несколько сдвинуты с их условного положения на геометрической нейтрали, то будут иметь место как поперечная, так и продольная реакции якоря.

В современных тяговых электрических машинах щетки обычно устанавливают так, чтобы они замыкали секции обмоток, находящиеся на линии геометрической нейтрали. В этом случае должна иметь место только поперечная реакция якоря, которой уделим основное внимание.

4.2. Линейная нагрузка и МДС якоря

Важнейшей характеристикой, определяющей степень использования материалов в машине, ее токовую загрузку, является *линейная нагрузка якоря*. Если число проводников якоря N, а ток в каждом проводнике (в параллельной ветви) — $i_я$, то линейная нагрузка

$$A = \frac{Ni_я}{\pi D_я} = \frac{NI_я}{2a\pi D_я} = \frac{NI_я}{4ap\tau}. \qquad (4.1)$$

Величина A, измеряемая в амперах на единицу длины окружности якоря, ограничивается в первую очередь условиями нагревания якоря и достигает значений $(450 \div 500) \cdot 10^2$ А/м.

Определим МДС якоря, считая, что его проводники равномерно распределены по окружности. На рис. 4.2 изображена развернутая машина на двойной длине полюсного деления. Линии поля якоря расположены симметрично относительно средней точки каждой области тока одного направления. Пусть одна из таких линий находится на расстоянии x от средней точки, тогда образованный ею замкнутый контур охватывает полный ток $A \cdot 2x$ ампер-проводников, и МДС для этой линии

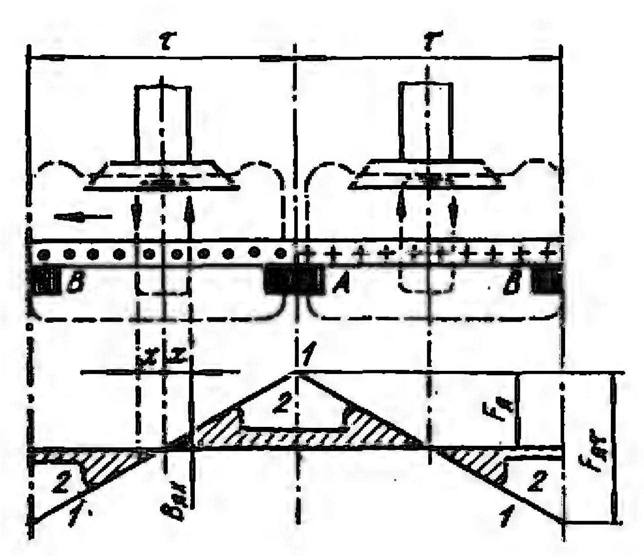


Рис. 4.2. Линии МДС и индукции якоря в машине без добавочных полюсов

равна

$$F_{яx} = A \cdot 2x. \quad (4.2)$$

Отсюда следует, что МДС якоря на длине полюсного деления изменяется линейно (линия *1—1* на рис. 4.2). На оси полюса $x = 0$ и $F_{яx} = 0$. Максимума МДС якоря достигает на линии геометрической нейтрали ($x = \tau/2$) и на пару полюсов (два зазора):

$$F_{я\tau} = A \cdot 2\tau/2 = A\tau, \quad (4.3)$$

а на один полюс (один зазор)

$$F_{я} = \tau A/2. \quad (4.4)$$

Под краем полюсного наконечника МДС [аналогично (4.4)]

$$F_{яb} = b_{п}A/2 = \alpha\tau A/2. \quad (4.5)$$

Если магнитным сопротивлением стали по сравнению с сопротивлением воздушного зазора пренебречь, то линия индукции в пределах полюсной дуги $B_{яx}$ повторит линию $F_{я}$; при соответствующем выборе масштаба они совпадут. Действительно, в этом случае

$$F_{яx} = 2xA = B_{яx} \cdot 2\delta_x/\mu_0,$$

где δ_x — значение воздушного зазора на расстоянии x от средней точки. Отсюда

$$B_{яx} = \mu_0 x A/\delta_x, \quad (4.6)$$

т. е. индукция поля якоря в точке с координатой x обратно пропорциональна воздушному зазору в этой точке. В межполюсном пространстве ($x > b_{п}/2$) вследствие увеличения длины магнитных силовых линий в воздухе индукция резко уменьшится, поэтому линия *2* примет седлообразную форму.

4.3. Искажающее и размагничивающее действие поперечной реакции якоря

Результирующее магнитное поле при нагрузке машины (см. рис. 4.1) было получено наложением полей якоря и полюсов. Построим теперь кривую индукции результирующего поля. Для этого на рис. 4.3 сложим ординаты кривых индукции поля полюсов *1* и поля якоря *2*. Результирующая кривая *3* имеет сложный вид и проходит через нуль не на линии геометрической нейтрали, а в точках *a* и *b*, определяющих положение физической нейтрали. Ограниченная этой кривой площадь (т. е. магнитный поток) по сравнению с площадью, ограниченной кривой *1*, при этом остается

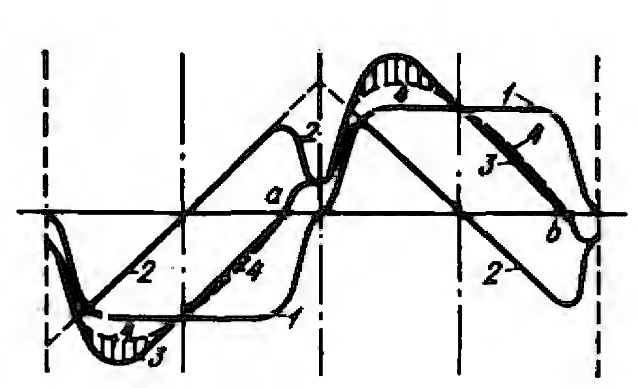


Рис. 4.3. Кривые индукции полей электрической машины

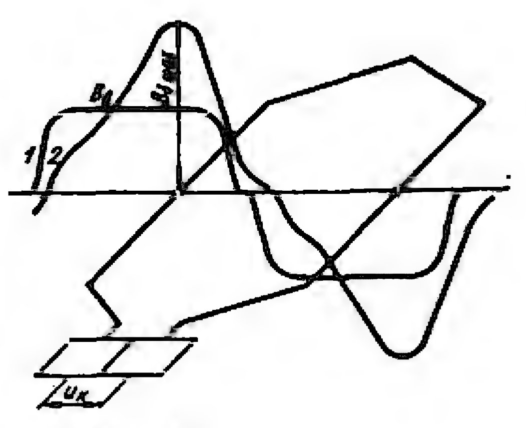


Рис. 4.4. Кривые индукции в воздушном зазоре при холостом ходе (*1*) и нагрузке (*2*)

неизменной. Действительно, ведь на сколько магнитный поток полюса ослаблен под одним краем полюсного наконечника (рис. 4.1, *б*), на столько усилен под другим. Так обстоит дело, если магнитная цепь машины ненасыщена.

В реальных электрических машинах отдельные участки магнитной цепи, особенно зубцы, сильно насыщены. Это приводит к тому, что уменьшение основного магнитного потока под одним краем полюса будет больше, чем его увеличение под другим: общее значение основного магнитного потока уменьшается. С учетом насыщения кривая индукции результирующего поля принимает вид штриховой кривой *4*. Заштрихованные площадки на рис. 4.3 эквивалентны потере основного магнитного потока.

Таким образом, можно говорить о двойном действии поперечной реакции якоря: при отсутствии насыщения она вызывает лишь *искажение кривой индукции в зазоре;* в реальной насыщенной машине одновременно уменьшается поток полюсов, т. е. имеет место и *размагничивающее действие* реакции якоря.

4.4. Напряжение между коллекторными пластинами, их число и диаметр коллектора

Искажающее действие поперечной реакции якоря — крайне нежелательное по своим последствиям явление. Оно приводит прежде всего к увеличению напряжения между смежными коллекторными пластинами.

Рассмотрим секцию простой петлевой обмотки (рис. 4.4). Если кривая индукции *1* не искажена, то на большей части длины полюсного деления напряжение между пластинами

$$u_к = 2B_δ l_я v. \quad (4.7)$$

При нагрузке, когда секция находится под краем полюса, где индукция достигает максимума ($B_{\delta_{max}}$ на кривой 2), напряжение между пластинами увеличивается:

$$u_{\text{к max}} = 2B_{\delta_{max}} l_я v. \qquad (4.8)$$

Из сравнения выражений (4.7) и (4.8) следует, что

$$u_{\text{к max}}/u_к = B_{\delta_{max}}/B_\delta. \qquad (4.9)$$

На рис. 2.2 действительная кривая индукции 1 заменена прямой 3, причем площади, ограниченные этими линиями, равновелики и согласно (3.21) $B_{\delta_{ср}} = \alpha B_\delta$. Поэтому среднее напряжение между смежными коллекторными пластинами, являющееся важнейшей расчетной величиной,

$$u_{к.ср} = 2B_{\delta_{ср}} l_я v = 2\alpha B_\delta l_я v. \qquad (4.10)$$

Отношение

$$u_{\text{к max}}/u_{к.ср} = B_{\delta_{max}}/(\alpha B_\delta) = k_{иск} \qquad (4.11)$$

назовем *максимальным коэффициентом искажения поля.* В тяговых машинах при некоторых режимах работы $k_{иск} \approx \approx 2$.

Опыт показывает, что при $u_{\text{к max}} = 36 \div 38$ В между коллекторными пластинами может возникнуть электрическая дуга. Поэтому число их должно выбираться так, чтобы значение $u_{к.ср}$ не превосходило 18—19 В.

Если на один полюс машины приходится $K/(2p)$ коллекторных пластин, а напряжение между щетками равно U, то

$$u_{к.ср} = \frac{U}{K/(2p)} = \frac{2pU}{K}, \qquad (4.12)$$

откуда

$$K = 2pU/u_{к.ср}. \qquad (4.13)$$

Таким образом, число коллекторных пластин зависит от значения напряжения.

Из выражения (3.30) с учетом (4.13) находим

$$D_к = \frac{\beta_к 2pU}{\pi u_{к.ср}}, \qquad (4.14)$$

т. е. при заданном значении $\beta_к$ диаметр коллектора зависит от напряжения U.

Действительно, если принять согласно (3.30) $\beta_к = 4{,}5$ мм, а $u_{к.ср} = 17{,}2$ В, то у четырехполюсного тягового двигателя с напряжением $U = 1500$ В диаметр коллектора

должен быть не менее

$$D_к = \frac{4,5 \cdot 4 \cdot 1500}{\pi \cdot 17,2} = 500 \text{ мм},$$

причем эта величина от мощности машины не зависит. Следовательно, напряжение U в значительной степени определяет и радиальные размеры машины.

4.5. Меры борьбы с искажающим действием поперечной реакции якоря

Воздушный зазор. Из сказанного в п. 4.2 и 4.3 следует, что искажение поля в воздушном зазоре тем меньше, чем он больше, так как с увеличением воздушного зазора его сопротивление магнитному потоку якоря увеличивается.

Но простое увеличение воздушного зазора приводит к увеличению сопротивления и основному магнитному потоку. Из выражения (4.6) видно, что важно не просто увеличить зазор, а увеличить его в той точке x, где реакция якоря наибольшая, т. е. под краем полюса. В некоторых случаях под воздействием реакции якоря вообще возможно изменение направления («опрокидывание») магнитного потока под одним краем полюса.

Чтобы этого не произошло, воздушный зазор по форме выполняют не равномерным, а увеличивающимся от центра к краям полюсного наконечника. Под центром полюса, где МДС якоря равна нулю, зазор делают небольшим, и тогда его сопротивление основному магнитному потоку практически не увеличивается.

Наибольшее распространение получил эксцентричный воздушный зазор, размер которого под краем полюса вдвое больше, чем под центром. Зазоры могут иметь и другую форму. Подбирая их размеры и конфигурацию, можно в той или иной мере уменьшить искажающее действие реакции якоря.

Компенсационная обмотка. Если на всей длине полюсного деления создать МДС, представляющую собой зеркальное отображение МДС якоря, то искажения поля полюсов, а с ним и опасного увеличения напряжения между смежными коллекторными пластинами не будет. Такую МДС на длине полюсной дуги можно получить с помощью *компенсационной* обмотки, включаемой последовательно в цепь якоря и укладываемой в пазы, выштампованные в наконечниках полюсов (рис. 4.5).

Витки компенсационной обмотки образуют стержни, расположенные симметрично относительно линии геометриче-

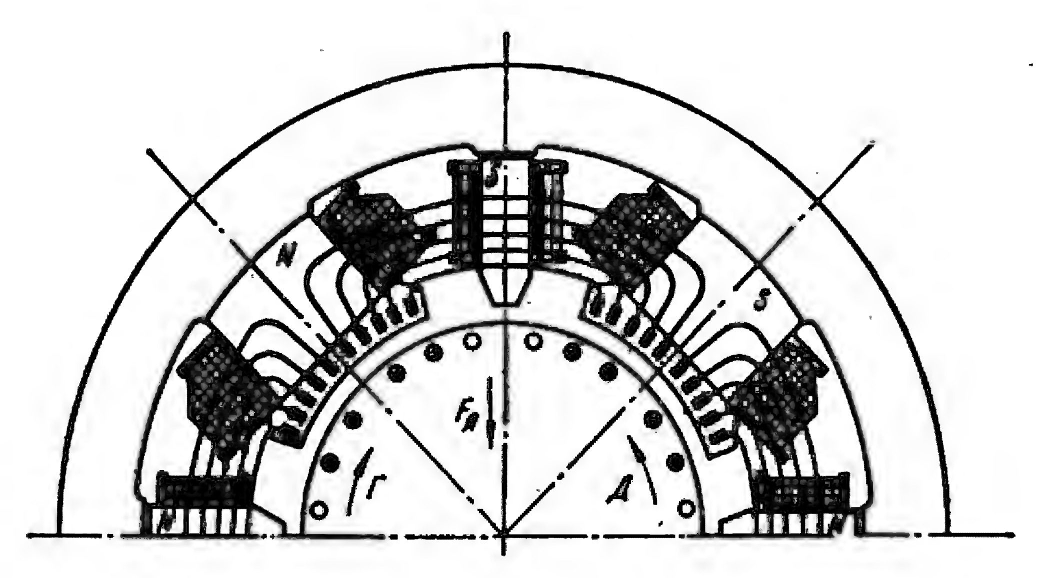


Рис. 4.5. Компенсационная обмотка и добавочные полюсы, устанавливаемые в электрической машине

ской нейтрали в разнополярных полюсах машины. Если линейные нагрузки якоря и компенсационной обмотки будут равны, то влияние реакции якоря на длине полюсного наконечника полностью устраняется.

Машины, снабженные компенсационными обмотками, называются *компенсированными*. Воздушный зазор в таких машинах по форме делают равномерным — концентрическим, а по значению — минимальным.

Компенсационная обмотка — сложное устройство. Она, как и любая другая обмотка, может явиться причиной выхода машины из строя во время ее эксплуатации. Однако эффективность использования этой обмотки настолько велика, что в настоящее время многие тяговые электрические машины выполняют компенсированными. Наличие компенсационной обмотки позволяет резко уменьшить воздушный зазор и, значит, МДС главных полюсов машины. Это способствует тому, что несмотря на дополнительный расход меди на изготовление компенсационной обмотки, в целом количество меди статора у компенсированных машин меньше, чем у машин без компенсационной обмотки.

Контрольные вопросы и задача

1. Что такое реакция якоря? Какая она может быть?
2. В каких случаях возникает продольная реакция якоря?
3. Что такое линейная нагрузка и что она характеризует?
4. Как распределяется на длине полюсного деления МДС якоря, где она максимальна?
5. Какие воздействия оказывает реакция якоря на работу машины и как они проявляются?
6. Что такое среднее напряжение между коллекторными пластинами?

7. Что такое коэффициент искажения поля?
8. Чем определяются количество коллекторных пластин в машине и диаметр коллектора?
9. Определить диаметр коллектора тягового двигателя, пользуясь данными и результатами решения задач 4 к гл. 2 и 8 к гл. 3.
10. Каковы возможные меры борьбы с искажающим действием поперечной реакции якоря?

Глава 5. КОММУТАЦИЯ

5.1. Искрение на коллекторе

При работе машины щетка и коллектор образуют скользящий контакт, под которым наблюдается более или менее интенсивное *искрение*. Лишь в редких случаях искрение отсутствует, а у тяговых электрических машин, работающих в исключительно тяжелых условиях, искрение есть практически всегда. Искрение вызывает эрозию коллектора, повышенный износ щеток и может даже вызвать их повреждение, а дальнейшую работу машины сделать невозможной.

Необходимо отметить, что стоимость ремонта в эксплуатации коллекторных машин, связанная с заменой щеток, проточкой и шлифовкой коллекторов, очень велика и составляет, например у тяговых двигателей локомотивов, за один год около $^1/_3$ стоимости самой машины. Поэтому устранение искрения или хотя бы уменьшение его интенсивности может дать существенный технико-экономический эффект.

Искрение — результат разрыва тока. Какие же причины могут вызвать его? Эти причины можно условно разделить на четыре основные группы:

а) *механические* — из-за неровности поверхности коллектора, выступающих пластин или межламельной изоляции, вибрации или плохой притирки щеток и их перекоса (заедания) в гнездах щеткодержателей. Следует помнить, что окружная скорость коллекторов современных тяговых двигателей достигает $v_к = 55$ м/с, что предъявляет исключительно высокие требования к механике скользящего контакта;

б) *физико-химические*, вызванные неудовлетворительным состоянием контакта щетка — коллектор. Для нормальной работы этого контакта, который представляют в виде находящихся в динамическом равновесии зернышек-контактов, непрерывно сгорающих и вновь образующихся, необходимы определенная температура, влажность, наличие кислорода и т. п. При этих условиях происходит процесс электролиза. Мельчайшие частицы графита, сгорая в кисло-

Таблица 4.1

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
$1\,^1/_4$	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	
$1\,^1/_2$	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузке	Появление следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетка остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

роде воздуха, образуют на поверхности коллектора тончайший орехового цвета слой окисленной пленки — *политуры*, предохраняющей, как смазка, коллектор и щетки от истирания. Если щетка скользит по коллектору при отсутствии тока, то политура не образуется, и происходит быстрый износ коллектора и щеток. Вот почему при транспортировке локомотива в «холодном» состоянии на длительное расстояние необходимо снять щетки с тяговых двигателей;

в) *электромагнитные*, когда происходит разрыв тока в секции, присоединенной к двум соседним коллекторным пластинам, по которым скользит щетка;

г) *потенциальные*, вызванные повышением напряжения между соседними коллекторными пластинами (см. п. 4.4). Такое искрение может перерасти в *круговой огонь* (см. п. 5.8).

Все эти причины, в конечном счете, связаны с вращением якоря и коллектора, во время которого секция переключается из одной параллельной ветви в другую (см. рис. 3.5). Во время этого переключения секция накоротко замыкается щеткой. А так как направление тока в параллельных ветвях по обе стороны от щетки противоположное, то ток в секции во время закорачивания ее щеткой меняет направление на обратное. Этот процесс носит название *коммутации*, а секция называется *коммутируемой*. Однако в более широком смысле слова под коммутацией понимают все явления и процессы, возникающие под щетками.

Поэтому, несмотря на различные причины, вызывающие искрение на коллекторе, говорят, что коммутация *хорошая*, если искрение очень слабое или его совсем нет. Если же искрение интенсивное, то говорят, что коммутация *плохая*.

Согласно ГОСТ 183—74, качество коммутации оценивают *степенью искрения под сбегающим краем щетки*, из-под которого выходят пластины коллектора при его вращении. Баллы степени искрения приведены в табл. 4.1.

В соответствии с ГОСТ 2582—81 — «Машины электрические вращающиеся тяговые», который распространяется на все электрические машины рельсового или безрельсового транспорта, коммутацию считают *удовлетворительной*, если в предусмотренных режимах испытаний не возникает остаточных деформаций или механических повреждений коллектора и щеткодержателей и они пригодны для дальнейшей работы без очистки или какого-либо исправления, а также если степень искрения не превышает $1^1/_2$ балла.

5.2. Процесс коммутации и ЭДС в коммутируемой секции

Рассмотрим процесс коммутации в секции, показанной на рис. 5.1, полагая, что:

а) ширина щетки $b_щ$ равна коллекторному делению $\beta_к$, т. е. щеточное перекрытие $\gamma = b_щ/\beta_к = 1$;

б) щетка всей своей поверхностью плотно прилегает к коллектору;

в) удельное сопротивление контакта щетка — коллектор не зависит от плотности тока в нем.

В начальный момент времени ($t = 0$), когда щетка контактирует с пластиной *1* (рис. 5.1, *а*), ток в секции $i = +i_я$, ток в первом «петушке» $i_1 = 2i_я$, а во втором — $i_2 = 0$. Через время $t = T_к$, называемое *периодом коммутации*, щетка сойдет с пластины *1* и установится на пластине *2* (рис. 5.1, *в*); при этом $i = -i_я$, $i_1 = 0$, $i_2 = 2i_я$.

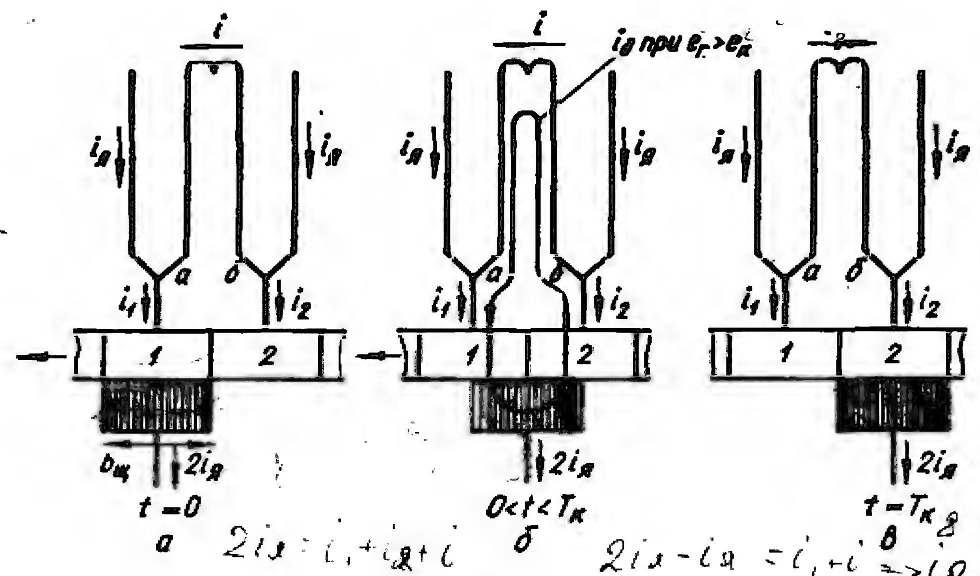


Рис. 5.1. Последовательные моменты коммутации секции якорной обмотки

Таким образом, в течение периода коммутации $T_к = b_щ/v_к$ ток в секции изменяется от $+i_я$ до $-i_я$, т. е. на $2i_я$.

Лежащая в пазах сердечника якоря секция обладает определенной собственной индуктивностью L_c. Значит, во время $0 < t < T_к$ в короткозамкнутой секции индуцируется ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L_c di/dt. \tag{5.1}$$

Поскольку якорные обмотки являются двухслойными, даже при $u_п = 1$ в реальном пазу находятся две стороны различных секций. Если обмотка диаметральная ($y_1 = \tau$), то все эти секции коммутируют одновременно, будучи замкнуты разными щетками (см. рис. 5.3, *а*). Кроме того, если щетка перекрывает несколько коллекторных пластин ($b_щ > \beta_к$), а $u_п > 1$, то в одном реальном пазу будут коммутировать одновременно несколько секций. В обоих этих случаях другие коммутируемые секции наведут в рассматриваемой секции ЭДС взаимоиндукции

$$e_M = -M di/dt, \tag{5.2}$$

где M — взаимная индуктивность.

Сумма ЭДС само- и взаимоиндукции носит название *реактивной* ЭДС:

$$e_р = e_L + e_M = -(L_c + M)\frac{di}{dt} = -L_р\frac{di}{dt}, \tag{5.3}$$

где $L_р$ — эквивалентная индуктивность секции, определяемая числом ее витков w_c и магнитной проводимостью окру-

жающей среды Λ. Тогда

$$L_p = w_c^2\Lambda. \qquad (5.4)$$

Щетка закорачивает секцию в том случае, когда последняя находится на линии геометрической нейтрали машины; поэтому в секции индуцируется ЭДС вращения $e_к$ от внешнего магнитного поля. Это внешнее поле является результирующим полем, создаваемым за счет реакции якоря и добавочными полюсами, которые устанавливают для улучшения процесса коммутации. Таким образом, в коммутируемой секции наводятся две ЭДС: реактивная $e_р$ и коммутационная $e_к$.

Пренебрегая (как ничтожно малыми) сопротивлениями самой секции и «петушков», составляем уравнение для короткозамкнутой секции (рис. 5.1, *б*), на основе закона Кирхгофа:

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = e_р + e_к, \qquad (5.5)$$

где $r_{щ1}$ и $r_{щ2}$ — сопротивления контакта щетка — коллектор соответственно на пластинах *1* и *2*.

Уравнение (5.5) называют *основным уравнением коммутации*. Оно является нелинейным дифференциальным уравнением, поскольку реактивная ЭДС пропорциональна di/dt, а коммутационная, как ЭДС вращения,— индукции $B_к$, создаваемой в зоне, где перемещаются коммутируемые секции. Решение уравнения (5.5) может быть получено при различных упрощающих предположениях.

5.3. Прямолинейная коммутация

Представим себе, что МДС добавочных полюсов выбрана таким образом, что коммутационная ЭДС равна по значению и противоположна по направлению реактивной, т. е. $e_к = -e_р$. Тогда сумма ЭДС в коммутируемой секции равна нулю, а уравнение (5.5) примет вид $i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = 0$, или

$$r_{щ1}/r_{щ2} = i_2/i_1. \qquad (5.6)$$

Таким образом, нелинейное дифференциальное уравнение (5.5) превратилось в линейное алгебраическое уравнение.

Очевидно, сопротивления $r_{щ1}$ и $r_{щ2}$ обратно пропорциональны площадям контактов щетки с пластинами *1* и *2*; следовательно, с учетом (5.6)

$$\frac{r_{щ1}}{r_{щ2}} = \frac{b_{щ2} l_щ}{b_{щ1} l_щ} = \frac{b_{щ2}}{b_{щ1}} = \frac{i_2}{i_1}, \qquad (5.7)$$

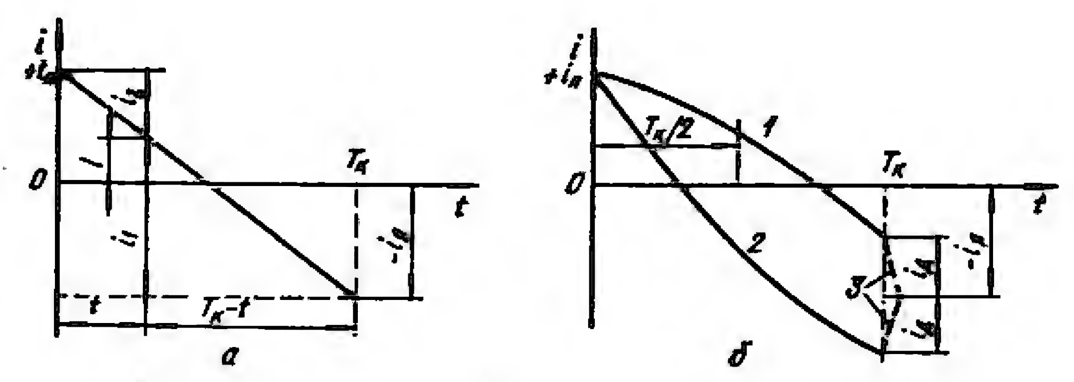


Рис. 5.2. Прямолинейная (*а*), замедленная и ускоренная (*б*) коммутации тока

где $l_щ$ — длина щетки, а $b_{щ1}$ и $b_{щ2}$ соответственно части ширины щетки, контактируемые с пластинами *1* и *2* в какой-то момент времени $0 < t < T_к$ (см. рис. 5.1, *б*).

При скорости $v_к$ любая точка на окружности коллектора за время $T_к$ проходит путь $b_щ$; значит, для данного момента времени t справедливо уравнение $b_{щ2}/t = b_щ/T_к$, или

$$b_{щ2} = b_щ t/T_к. \qquad (5.8)$$

Аналогично $b_{щ1}/(T_к - t) = b_щ/T_к$, или $b_{щ1} = b_щ \dfrac{T_к - t}{T_к}$.

(5.9)

Подставим (5.8) и (5.9) в (5.7) и, преобразовав, получим

$$\frac{t}{T_к - t} = \frac{i_2}{i_1}. \qquad (5.10)$$

Как видно, токи в «петушках», т. е. на соответствующих коллекторных пластинах, распределяются прямо пропорционально времени коммутации.

Для этого же момента времени, согласно закону Кирхгофа,

$$i_1 = i_я + i; \quad i_2 = i_я - i. \qquad (5.11)$$

Совместное решение относительно i (5.10) и (5.11) дает следующий результат:

$$i = i_я\left(1 - \frac{2t}{T_к}\right). \qquad (5.12)$$

Зависимость *переходного тока* секции i от t, согласно выражению (5.12), является линейной (рис. 5.2, *а*), поэтому такая коммутация называется *прямолинейной*.

Отметим ее основные особенности. Во время $t = T_к/2$, т. е. когда щетка находится точно посередине на пластинах *1* и *2*, $i_1 = i_2$ [это следует и из уравнения (5.10)], а ток в

секции в это время $i = 0$. Затем, при $t > T_к/2$, ток в секции, изменив свое направление, начинает увеличиваться и в последний момент коммутации, когда $t = T_к$, коллекторная пластина *1* выходит из-под сбегающего края щетки без разрыва тока, так как, согласно уравнениям (5.11) и (5.12), $i_1 = i_я + i = i_я + i_я(1 - 2T_к/T_к) = 0$. Весь ток в это время проходит через пластину *2*. Поскольку нет разрыва тока, не будет и искрения.

Итак, в случае прямолинейной коммутации, когда сумма ЭДС в секции равна нулю ($e_к = -e_r$), искрения по электромагнитным причинам нет.

При прямолинейной коммутации скорость изменения тока $di/dt = \text{const}$; за время $T_к$ ток в секции изменился на $2i_я$; следовательно, $di/dt = -2i_я/T_к$.

Реактивная ЭДС при этом также является постоянной и, согласно выражению (5.3), равной

$$e_р = L_р \frac{2i_я}{T_к}. \tag{5.13}$$

5.4. Замедленная и ускоренная коммутация

В общем случае сумма ЭДС в коммутируемой секции не равна нулю, т. е. в уравнении (5.5) $e_р + e_к \neq 0$. Но если в короткозамкнутой секции есть ЭДС, значит, в ней появится и ток. Этот ток, накладывающийся на основной и замыкающийся через коллекторные пластины поперек щетки, называется *добавочным поперечным током коммутации* (ток $i_д$ на рис. 5.1, *б*).

Очевидно, при сходе щетки с пластины *1* произойдет разрыв электрической цепи с током $i_д$, что и вызовет искрение под щеткой. Направление добавочного поперечного тока коммутации и характер коммутации при этом зависят от соотношения между ЭДС $e_р$ и $e_к$.

Пусть $|e_р| > |e_к|$, тогда в коммутируемой секции останется небалансная ЭДС $\Delta e_р$. По закону Ленца, направление ЭДС $e_р$, а значит, и $\Delta e_р$ должно быть таково, чтобы воспрепятствовать тому явлению, в результате которого она возникла. Следовательно, ЭДС $\Delta e_р$ и обусловленный ею ток $i_д$ будут направлены так, чтобы поддержать протекание в прежнем направлении тока в секции (см. рис. 5.1, *б*), вследствие чего линия изменения тока искривляется, а ток изменит свое направление позднее времени $t = T_к/2$. Такая коммутация называется *замедленной* (кривая *1* на рис. 5.2, *б*). Разрыв щеткой тока $i_д$ приводит к искрению между сбегающим краем щетки и коллекторной пластиной *1*.

Если $|e_р| < |e_к|$, то добавочный поперечный ток, обусловленный наличием небалансной ЭДС $\Delta e_к$, стремится ускорить процесс коммутации. Коммутация будет *ускоренной* (кривая *2* на рис. 5.2, *б*), т. е. изменение направления тока в секции произойдет быстрее, чем это требуется для безыскровой работы щеток (раньше времени $t = T_к/2$). Сбегающий край щетки и при ускоренной коммутации разрывает ток $i_д$, значит и в этом случае будет наблюдаться искрение под щетками.

В обоих случаях коммутации (замедленная или ускоренная) в коммутируемой секции устанавливается ток параллельной ветви ($-i_я$) позднее времени $T_к$: переходный ток i продолжает течь через горящую дугу (штриховые линии *3* на рис. 5.2, *б*). Степень искрения зависит от значения разрываемого тока, которое, в свою очередь, определяется значением небалансной ЭДС $\Delta e_р$ или $\Delta e_к$.

Очевидно, применение щеток с большим переходным сопротивлением в месте контакта с коллектором уменьшает значение тока $i_д$ и степень искрения. В этом же направлении действует разделение щетки на две части (см. п. 1.2), поскольку переходное сопротивление между двумя половинками щетки несколько уменьшает ток $i_д$.

Чем меньше значение реактивной ЭДС, тем легче добиться более или менее полной ее компенсации, тем меньше будет разрываемый ток $i_д$, а следовательно, и степень искрения.

5.5. Реактивная ЭДС и способы ее уменьшения

Мы выяснили причину возникновения реактивной ЭДС. Рассмотрим теперь факторы, от которых зависит ее значение.

На рис. 5.3, *а* показан момент одновременной коммутации секций *1* и *2* петлевой обмотки с полным шагом $y_1 = \tau$. При этом в секции *1* возникает ЭДС самоиндукции e_{L1} и ЭДС взаимоиндукции e_{M21} от секции *2*, а в секции *2* появляются ЭДС e_{L2} и e_{M12}, т. е. возникает реактивная ЭДС [см. выражение (5.3)].

При укороченной обмотке, когда $y_1 < \tau$ (этому случаю соответствует рис. 5.3, *б*), секции *1* и *2* лежат в разных пазах и при коммутации не влияют друг на друга, т. е. ЭДС $e_M = 0$. Это справедливо лишь в случае $u_п = 1$.

В реальных машинах всегда $u_п > 1$, а щетка перекрывает несколько коллекторных пластин. Поэтому полностью исключить появление в коммутируемых секциях ЭДС взаимоиндукции невозможно, но все же укорочение обмотки

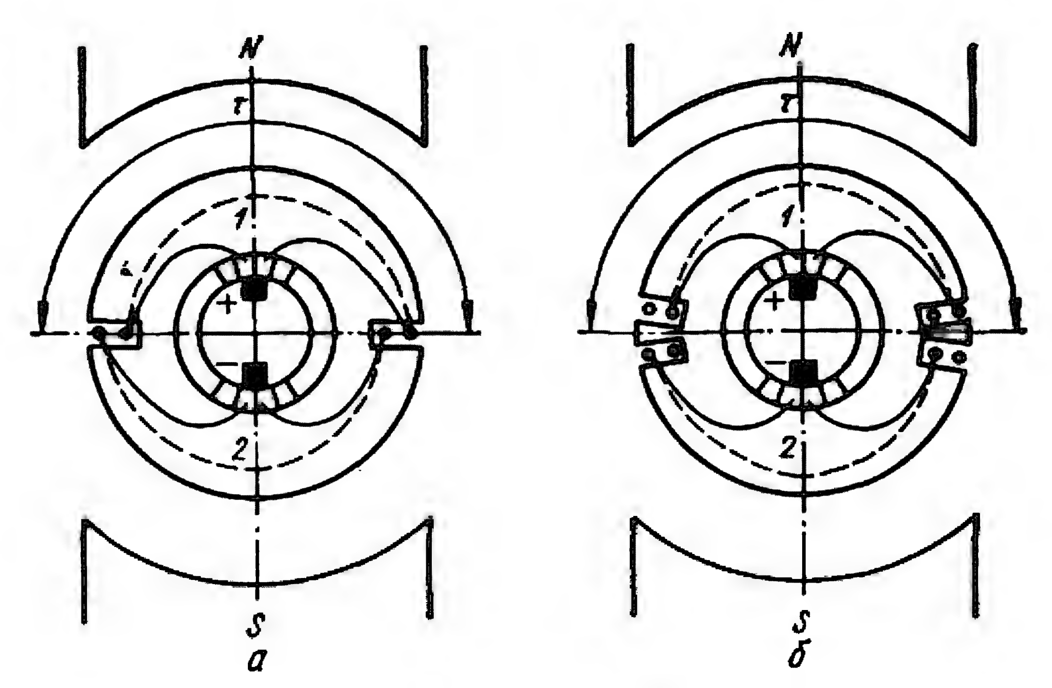


Рис. 5.3. Коммутация секций петлевой обмотки при $z_э = z$ ($u_п = 1$):

а — секции *1* и *2* наводят друг на друга ЭДС взаимоиндукции; *б* — секции *1* и *2* не влияют друг на друга при коммутации

существенно снижает значение e_M, а значит, и реактивную ЭДС.

Определим значение реактивной ЭДС для случая прямолинейной коммутации, для чего в выражение (5.13) подставим (5.4); тогда

$$e_р = w_с^2 \Lambda \frac{2i_я}{T_к}. \tag{5.14}$$

Обозначим через λ удельную магнитную проводимость на единицу длины секции, которая имеет две стороны (каждая длиной $l_я$); тогда $\Lambda = 2l_я\lambda$, а выражение (5.14) примет вид

$$e_р = 2l_я w_с^2 \lambda \frac{2i_я}{T_к}. \tag{5.15}$$

Поскольку коллекторное деление $\beta_к = \pi D_к/K$, а щеточное перекрытие $\gamma = b_щ/\beta_к = Kb_щ/(\pi D_к)$, то $b_щ = \gamma\pi D_к/K$; тогда период коммутации

$$T_к = \frac{b_щ}{v_к} = \frac{\gamma\pi D_к/K}{\pi D_к n} = \frac{\gamma}{Kn}. \tag{5.16}$$

В реальных машинах щеточное перекрытие $\gamma = 2{,}5 \div 4{,}5$.

Чтобы иметь представление о значении $T_к$, рассмотрим тяговый двигатель, у которого номинальная частота вращения $n = 720$ об/мин $= 12$ об/с, $K = 300$ и $\gamma = 3{,}6$. При этих условиях $T_к = 3{,}6/(300 \cdot 12) = 0{,}001$ с. У других машин значение $T_к$ может быть еще меньше, поэтому процесс

коммутации по отношению к внешней цепи машины является периодическим процессом с частотой 1000 Гц и более.

Согласно (3.1, *а*), число витков в секции $w_с = N/(2K)$, тогда $w_с^2 = w_с N/(2K)$. Подставим это значение, а также выражение (5.16) в (5.15), которое умножим и разделим на $\pi D_я$; тогда

$$e_р = 2l_я w_с \frac{N}{2K} \lambda \frac{2i_я}{\gamma} Kn \frac{\pi D_я}{\pi D_я}. \qquad (5.17)$$

Упростим это выражение. Числа $2K$ в числителе и знаменателе сокращаются, $i_я N/(\pi D_я) = A$ есть линейная нагрузка [см. выражение (4.1)], $\pi D_я n = v_я$ — окружная скорость якоря. С учетом этого выражение (5.17) приобретает вид

$$e_р = 2l_я w_с A v_я \lambda/\gamma. \qquad (5.18)$$

Анализ выражения (5.18) позволяет установить способы снижения значения $e_р$. Самым главным и бесспорным из них является применение в мощных машинах с тяжелыми условиями коммутации одновитковых секций ($w_с = 1$). Стремление к снижению значений A и $v_я$ хотя и приведет к уменьшению реактивной ЭДС, но в то же время ухудшит использование материалов в машине и вызовет увеличение ее размеров.

Существенное влияние на снижение реактивной ЭДС может оказать уменьшение магнитной проводимости λ потока, сцепленного с секцией и замыкающегося вокруг проводника. Поэтому при прочих равных условиях машина с более широким и мелким пазом, оказывающим большое сопротивление для этого потока, будет иметь меньшее значение $e_р$, чем машина с узким и глубоким пазом.

Значительное снижение значения $e_р$ и, как результат, улучшение условий коммутации достигнуты в беспазовых якорях тяговых электродвигателей. Эти якори представляют собой гладкие барабаны, на которых укладываются обмотки, укрепляемые бандажированием стеклопластиками, пропитываемыми в эпоксидном компаунде горячего отверждения и образующими изоляцию типа «монолит». Отсутствие зубцов в гладком якоре приводит к значительному снижению значения λ, а значит, и реактивной ЭДС.

Увеличение щеточного перекрытия γ хотя и приводит к повышению влияния взаимной индукции из-за увеличения числа одновременно коммутируемых секций, но в небольшой степени, и значение $e_р$ все же снижается.

Значительное увеличение перекрытия γ недопустимо по причинам, которые излагаются в п. 5.7 [формула (5.23)].

5.6. Коммутационная ЭДС и добавочные полюсы

Выполнение условия прямолинейной безыскровой коммутации требует внесения в коммутируемую секцию ЭДС $e_к = -e_р$. Эту задачу выполняют добавочные полюсы, устанавливаемые на линии геометрической нейтрали, т. е. там, где происходит коммутация (см. рис. 4.5). В воздушном зазоре под добавочными полюсами создается коммутационное магнитное поле с индукцией $B_к$, которое и наводит ЭДС $e_к$. Согласно закону Фарадея,

$$e_к = 2B_к l_я w_с v_я. \qquad (5.19)$$

Чтобы выдержать условие безыскровой прямолинейной коммутации, необходимо уравнять правые части выражений (5.18) и (5.19); тогда

$$B_к = -A\lambda/\gamma. \qquad (5.20)$$

Знак «минус» обеспечивается установлением соответствующей полярности добавочных полюсов; поскольку линейная нагрузка пропорциональна току якоря $I_я$, индукция $B_к$ также должна быть пропорциональна ему, т. е.

$$B_к \sim I_я. \qquad (5.20,а)$$

Для обеспечения этого условия *добавочные полюсы включают последовательно с якорем, а их магнитную цепь выполняют ненасыщенной.*

Последнее требование обеспечивается, если тело добавочного полюса имеет наибольшие размеры. Кроме того, воздушный зазор под добавочными полюсами целесообразно разбить на две части, установив дополнительно немагнитную прокладку между полюсами и станиной (рис. 5.4). Этот второй «воздушный зазор» гораздо более эффективен, чем первый, так как он создает дополнительное сопротивление потоку рассеяния Φ_σ, который насыщает сердечник полюса.

Все же, несмотря на принимаемые меры по расслаблению магнитной цепи добавочных полюсов, обеспечить линейную зависимость между индукцией $B_к$ и током $I_я$ во всем диапазоне нагрузок не удается. Эта зависимость остается криволинейной, все более и более отклоняясь от прямой с увеличением тока $I_я$.

На рис. 5.5 показан график изменения ЭДС $e_р$ и $e_к$ в зависимости от тока якоря $I_я$. Если, согласно выражению (5.18), между $e_р$ и $I_я$ и соблюдается линейная зависимость во всем диапазоне нагрузок, то между $e_к$ и $I_я$ прямой зависимости нет. Это одна из причин, из-за которой в коммутируе-

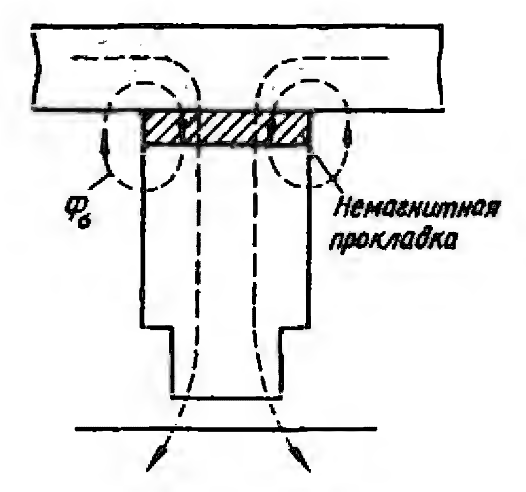


Рис. 5.4. Установка немагнитной прокладки между добавочным полюсом и станиной

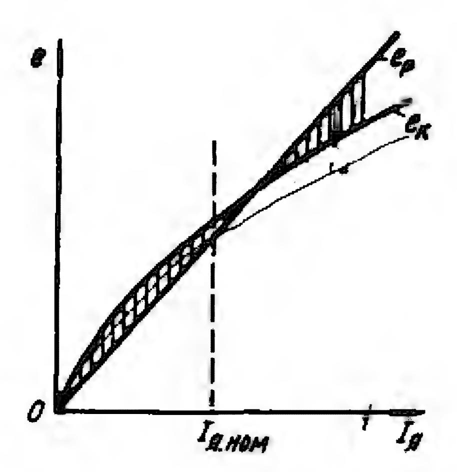


Рис. 5.5. Зависимости реактивной и коммутационной ЭДС от тока якоря

мой секции практически не удается выполнить условие $e_к = -e_р$ во всем диапазоне нагрузок. А раз это так, то добавочные полюсы необходимо настраивать таким образом, чтобы небалансная ЭДС (заштрихованная часть на рис. 5.5) была наименьшей. Настройку добавочных полюсов производят изменением либо числа их витков, либо размеров воздушного зазора или немагнитной прокладки между полюсом и станиной. При этом изменяется их магнитный поток, индукция $B_к$, а следовательно, и ЭДС $e_к$. Ее значение в номинальном режиме следует выбрать несколько бо́льшим реактивной ЭДС, что обеспечит ускоренную коммутацию.

Действительно, если при номинальном токе $I_{я.ном}$ установить точное равенство реактивной и коммутационной ЭДС (провести кривую $e_к$ на рис. 5.5 несколько ниже), то при токах больше номинального, т. е. в очень тяжелых режимах работы, реактивная ЭДС станет значительно больше коммутационной и эта сильно замедленная коммутация приведет к интенсивному искрению. Напомним, что в диапазоне больших токов очень велико искажающее действие поперечной реакции якоря, что может привести еще и к искрению по потенциальным причинам. А это уже является опасным для дальнейшей работоспособности машины.

В эксплуатационных условиях неравенство между реактивной и коммутационной ЭДС вызывается еще целым рядом причин. К ним относятся: технологические допуски при изготовлении коллектора, установке щеткодержателей и самих добавочных полюсов; перегрузки по току и превышение частоты вращения (буксование тяговых двигателей); нестабильность щеточного контакта, из-за чего постоянно меняется площадь контакта щетки с коллектором (период

коммутации $T_к$) или даже полный отрыв щетки от коллектора при проходе, например, локомотивом неровностей пути. Все эти причины увеличивают и без того имеющееся неравенство между $e_р$ и $e_к$, а значит, способствуют более интенсивному искрению.

Роль добавочных полюсов не ограничена лишь задачей неведения ЭДС $e_к$; индукция $B_к$, требуемая для этого, обычно мала, поскольку реактивная и коммутационная ЭДС, как правило, не превышают 4—6 В. Однако МДС добавочных полюсов должна быть очень большой, так как она направлена против поперечной реакции якоря и в определенной степени ее компенсирует. Это особенно важно, если в машине нет компенсационной обмотки.

Исходя из сказанного выше можно определить полярность добавочных полюсов: в *генераторном* режиме она должна быть такой же, как у следующего за ним по направлению вращения главного полюса; в *двигательном* режиме — как у предшествующего ему по направлению вращения главного полюса.

5.7. Зона коммутации

Искрение под щеткой может возникнуть, если коммутируемая секция попадает в зону сильного поля главных полюсов, и щетка вынуждена будет разрывать цепь с большим током. Поэтому коммутация должна начинаться после выхода секции из-под поля главных полюсов и заканчиваться ранее, чем она попадает под следующий главный полюс.

Дуга окружности якоря, которую проходит ось паза в течение времени коммутации всех его секций, называется *зоной коммутации*.

Рассмотрим пример коммутации диаметральной петлевой обмотки, схема которой представлена на рис. 5.6, *а* и *б*. Все секции паза последовательно коммутируются щеткой, причем каждая последующая заканчивает коммутацию через время $t_к$ после предыдущей. Период коммутации каждой секции — $T_к$, а полный период коммутации паза — $T_п$. На диаграмме коммутации (рис. 5.6, *в*) прямоугольниками показано распределение времени при прямолинейной коммутации каждой секции паза. Видно, что когда еще продолжается коммутация первой секции, закорачивается вторая, затем третья.

Если в общем случае число коллекторных пластин, приходящееся на один паз $u_п = K/z$, то

$$T_п = T_к + (u_п - 1)\,t_к. \qquad (5.21)$$

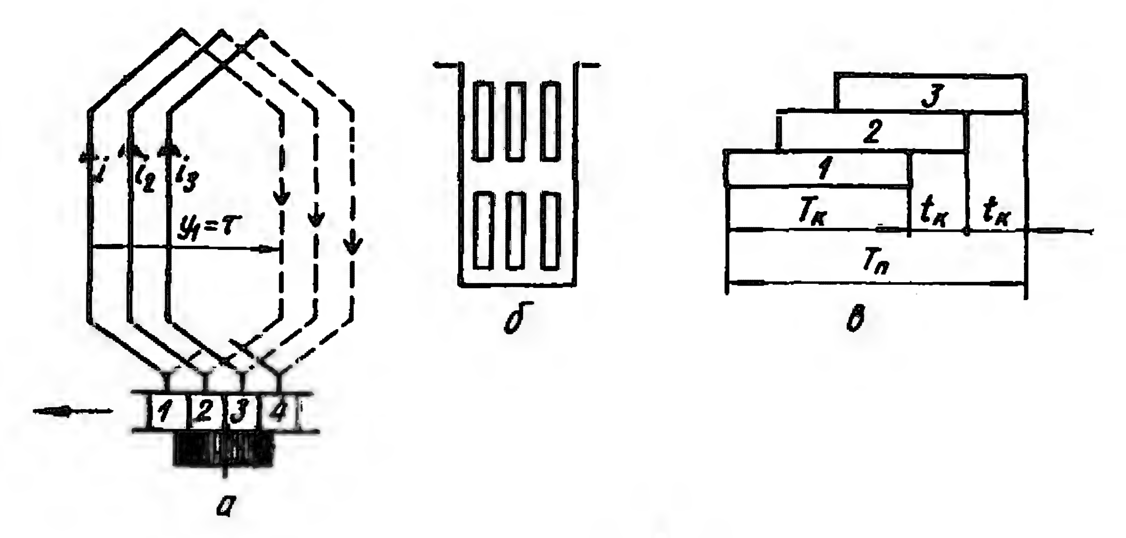


Рис. 5.6. Схема диаметральной петлевой обмотки (*а*), расположение секций в пазу при $u_п = 3$ (*б*) и диаграмма их коммутации (*в*)

Нетрудно заметить, что если коллекторное деление $\beta_к = \pi D_к/K$, а окружная скорость коллектора $v_к = \pi D_к n$, то сдвиг по времени коммутации каждой последующей секции $t_к = \beta_к/v_к = 1/(Kn)$. С учетом этого, а также формулы (5.16), выражение (5.21) примет вид

$$T_п = \frac{\gamma}{Kn} + \frac{(u_п - 1)}{Kn} = \frac{\gamma + u_п - 1}{Kn}. \qquad (5.22)$$

Ширину зоны коммутации можно определить, умножив время $T_п$ на скорость $v_я = \pi D_я n$; тогда

$$b_{з.к} = \pi D_я (\gamma + u_п - 1)/K. \qquad (5.23)$$

Ее можно также выразить через ширину щетки $b_щ$ и коллекторное деление $\beta_к$; поскольку $\gamma = b_щ/\beta_к$, а $\pi D_я/K = \beta_к D_я/D_к$,

$$b_{з.к} = [b_щ + (u_п - 1)\beta_к]\frac{D_я}{D_к}. \qquad (5.23,а)$$

При укорочении обмотки на величину ε время коммутации паза увеличится на $\varepsilon t_к$; кроме того, для обмотки любого типа в выражении (5.23) единицу следует заменить отношением a/p (для петлевой обмотки $a/p = 1$). Тогда в общем виде

$$b_{з.к} = \left[b_щ + \left(u_п - \frac{a}{p} + \varepsilon\right)\beta_к\right]\frac{D_я}{D_к}. \qquad (5.24)$$

Коммутация должна начаться и закончиться вблизи геометрической нейтрали и, как показывает практика, зона коммутации не должна превышать половины расстояния между наконечниками главных полюсов.

Если полюсное деление τ, а длина полюсной дуги $b_п = \alpha\tau$ (см. п. 2.1), то расстояние между наконечниками полюсов $\tau - b_п = \tau - \alpha\tau = \tau(1 - \alpha)$.

Таким образом, необходимо выдержать условие

$$b_{з.к} \leqslant 0{,}5\tau(1 - \alpha). \quad (5.25)$$

На основании условия (5.25) необходимо правильно выбирать ширину щетки (или перекрытие γ), не допуская ее чрезмерного увеличения и согласовывая с коэффициентом полюсного перекрытия α, несмотря на то что при увеличении γ уменьшается реактивная ЭДС.

5.8. Круговой огонь и причины его возникновения

Выше отмечалось, что искрение на коллекторе может быть вызвано также потенциальными причинами, причем оно может перерасти в круговой огонь.

Перекрытие мощной электрической дугой поверхности коллектора между щетками противоположной полярности или одним из щеткодержателей и корпусом называют *круговым огнем*. Круговой огонь всегда опасен, так как приводит к серьезным повреждениям электрической машины. Возникновение кругового огня сопровождается сильным световым и звуковым эффектом, в крупных машинах это похоже на взрыв бомбы.

Причиной возникновения кругового огня является чрезмерно высокое напряжение между смежными коллекторными пластинами, которые могут оказаться замкнутыми через «мостик», образуемый угольной пылью или более крупными осколками щетки. По «мостику» проходит ток, происходит его сгорание и возникает короткая дуга, что равноценно замыканию части машины, состоящей из одной секции, на малое сопротивление. Увеличивающийся ток дуги вызывает оплавление коллекторных пластин, а сама дуга, развиваясь, замыкает и соседние пластины.

Если же напряжение между смежными коллекторными пластинами не превышает 33—34 В, то даже при выгорании проводящего «мостика» круговой огонь не возникает. Нельзя, как это часто допускают, объяснить возможность возникновения кругового огня повышенной ионизацией коллекторной камеры от сильного искрения.

Схема очень быстротечного (0,01—0,001 с) процесса перерастания единичной вспышки в круговой огонь показана на рис. 5.7, где *1* — первичная дуга, *2* — газы и пары меди, *3* — мощная дуга. Такая быстротечность приводит к тому,

что не удается создать от него какую-либо защиту. Ток в дуге, возникшей из-за наличия проводящего «мостика» между пластинами *a* и *b*, быстро увеличивается и пространство над коллектором ионизируется, т. е. заполняется парами раскаленной меди. Коллектор вращается, дуга перекрывает несколько пластин, ток возрастает. Дальнейшее развитие процесса носит случайный характер. Процесс на рис. 5.7 снят при скорости 4000 кадров в секунду.

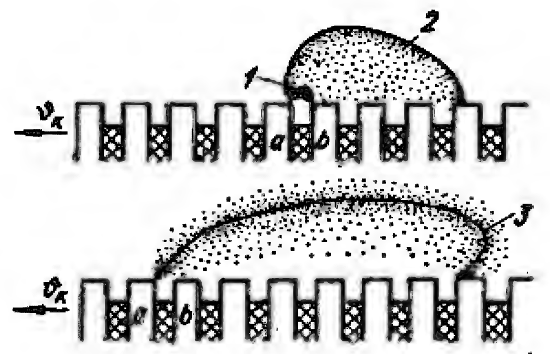


Рис. 5.7. Возникновение кругового огня на коллекторе

Очевидно, чем тоньше межламельная изоляция и чем меньше размеры коллекторного деления, тем меньшее напряжение между коллекторными пластинами может быть допущено. Критерием здесь служит значение напряжения на единицу длины окружности коллектора

$$\varepsilon_{max} = u_{к\,max}/\beta_к \leqslant 8 \div 9 \text{ В/мм (см. п. 4.4).}$$

Искрение под щетками способствует возникновению кругового огня, так как при этом происходит интенсивный износ щетки, появляется вероятность образования «мостиков». Но само по себе искрение с вытягиванием, как считалось долгое время, дуги из-под щетки не приводит к круговому огню. Так, когда у тягового двигателя на стенде отключили обмотку добавочных полюсов, возникшее при этом весьма сильное и достаточно продолжительное искрение не привело к круговому огню. Однако в другом случае на мощном генераторе, работающем в режиме холостого хода со снятыми щетками, круговой огонь возникал при достаточно высоком напряжении между коллекторными пластинами, когда между последними осколком щетки создавали «мостик» или вспомогательным электродом искусственно зажигали короткую дугу.

Итак, для уменьшения вероятности появления круговых огней необходимо устанавливать оптимальное межламельное напряжение и улучшать состояние узла щетка-коллектор.

Важно содержать в чистоте поверхность коллектора, миканитовых манжет, систематически чистить канавки между коллекторными пластинами и щеткодержатели, удалять с поверхности коллектора следы поджогов, заусенцы, своевременно менять изношенные и сколотые щетки, поддерживать нормальное давление нажимных пальцев. Склонность

тяговых двигателей к круговым огням повышается при неудовлетворительной динамике щеток, особенно при прохождении колесной парой стыков на путях. Желательно иметь наиболее эластичное нажимное устройство, прижимающее щетки к коллектору.

5.9. Экспериментальная проверка и настройка добавочных полюсов

Расчет коммутации и добавочных полюсов ввиду сложности коммутационного процесса является приближенным. Поэтому при проведении квалификационных испытаний, которым согласно ГОСТ 2582—81 подвергают машины новых типов, определяют область наилучшей коммутации (ГОСТ 10159—79), которая позволяет оценить коммутационные свойства машины и настроить добавочные полюсы путем изменения числа витков их обмотки или размеров воздушного зазора. При этом изменяются индукция $B_к$ и коммутационная ЭДС, что позволяет в максимальной степени приблизиться к условию безыскровой коммутации $e_к = —e_р$.

Для такой настройки добавочных полюсов собирают схему (рис. 5.8), где *Я1* — якорь испытуемой машины, *ОВ1* — ее обмотка возбуждения, *ДП* — ее обмотка добавочных полюсов; *Я2* — якорь вспомогательного генератора, *ОВ2* — его обмотка возбуждения. С помощью вспомогательного генератора обмотку *ДП* питают дополнительным током ($\pm \Delta I$), который называют *током подпитки;* таким образом, через обмотку *ДП* проходит ток $I_я \pm \Delta I$, что позволяет снять зависимости $+\Delta I = f(I_я)$ и $-\Delta I = f(I_я)$ — *кривые подпитки* — в пределах нагрузок от холостого хода до номинальной и выше (рис. 5.9), при которых коммутация соответствует степени искрения 1 (можно снять кривые подпитки для любой степени искрения: 1 1/4, 1 1/2 и 2).

Опыт начинают с режима холостого хода, когда $I_я = 0$ и $e_р = 0$. Подпитывая добавочные полюсы сначала в одном, а затем в другом направлении, устанавливают значения токов $+\Delta I$ и $-\Delta I$, при которых начинается первое заметное на глаз искрение. Причиной этого искрения является ток в короткозамкнутой секции, вызванный коммутационной ЭДС $e_к$, создаваемой индукцией $B_к$, т. е. тока-

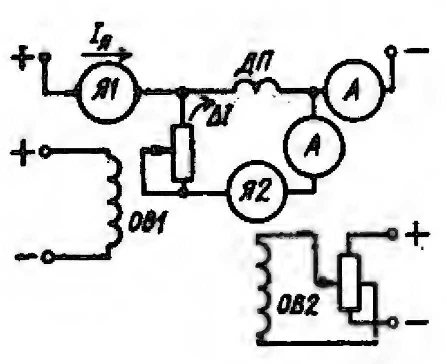


Рис. 5.8. Схема для настройки добавочных полюсов

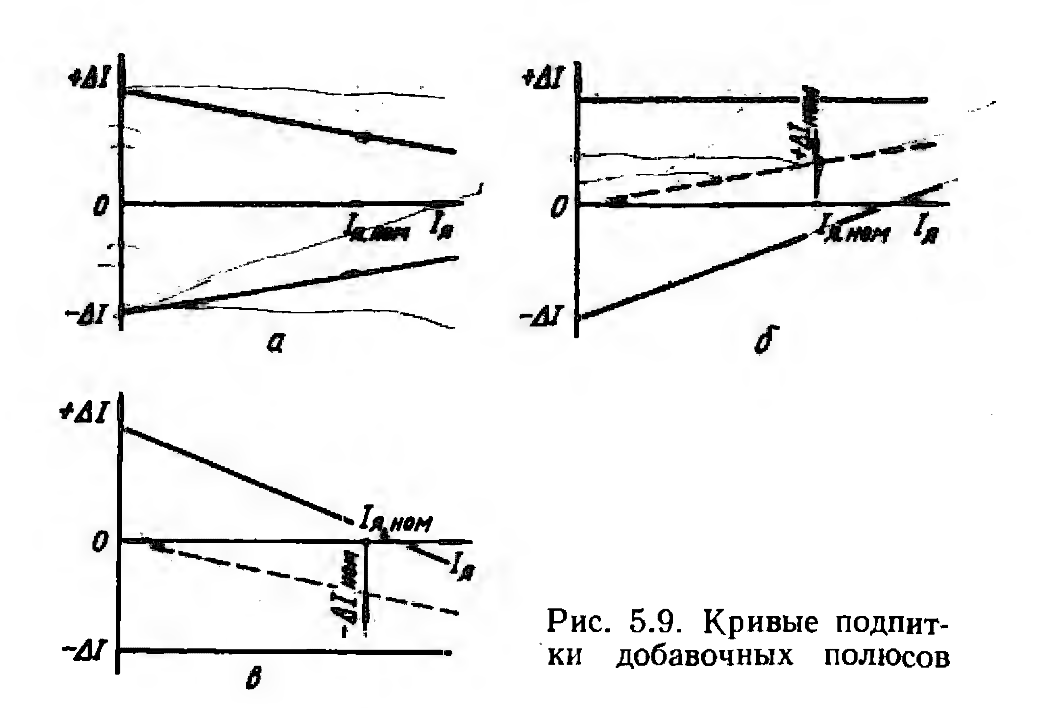


Рис. 5.9. Кривые подпитки добавочных полюсов

ми подпитки. В правильно спроектированной и идеально изготовленной машине токи $+\Delta I$ и $-\Delta I$ при $I_я = 0$ равны между собой.

Затем машину нагружают некоторым током $I_я$ и снова определяют токи $+\Delta I$ и $-\Delta I$, приводящие к искрению.

Если бы машина была идеальной и всегда соблюдалось условие $e_к = -e_р$, то при любых токах $I_я$ токи подпитки, вызывающие искрение, оставались бы неизменными и кривые подпитки имели бы вид двух прямых, параллельных оси абсцисс, находящихся от нее на одинаковом расстоянии, определяемом значениями $+\Delta I$ и $-\Delta I$, полученными при $I_я = 0$. Однако при любом токе $I_я > 0$, как это указано в п. 5.6, в коммутируемой секции имеется неравенство между $e_р$ и $e_к$, т. е. существует некоторая небалансная ЭДС Δe, причем она увеличивается с ростом тока $I_я$ или частоты вращения n. Поэтому при возрастании тока $I_я$ значения $+\Delta I$ и $-\Delta I$, вызывающие первое искрение, уменьшаются и кривые подпитки образуют сужающуюся область безыскровой работы, симметричную оси абсцисс (рис. 5.9, *а*).

Если в машине добавочные полюсы слабые ($|e_к| < |e_р|$, коммутация замедленная), то для получения области безыскровой работы во всем диапазоне нагрузок приходится подпитывать добавочные полюсы токами $+\Delta I$. При этом средняя линия области лежит выше оси абсцисс (рис. 5.9, *б*). При чрезмерно сильных добавочных полюсах ($|e_к| > |e_р|$, коммутация ускоренная, токи подпитки $-\Delta I$) средняя линия области безыскровой работы отклонится вниз (рис. 5.9, *в*).

Повторение опыта при увеличенной частоте вращения позволяет получить кривые подпитки, образующие более узкую область безыскровой работы.

Если число витков добавочных полюсов $w_д$, то требующееся изменение его можно определить по результатам опыта:

$$\pm \Delta w_д = \frac{\pm \Delta I_{ном}}{I_{я.ном}} w_д.$$

В крупных машинах число $w_д$ мало и $\Delta w_д$ может составить дробную величину, округление которой приведет к большой погрешности. В таком случае изменяют размеры воздушного зазора.

Ширина области безыскровой работы характеризует коммутационную устойчивость машины при случайных отклонениях условий коммутации от оптимальных. Например, резкий наброс в эксплуатации тока нагрузки от $I_{я1}$ до $I_{я2}$ на $+\Delta I = I_{я2} - I_{я1}$ практически эквивалентен случаю снятия точки на кривой подпитки при токе $I_{я1}$. Очевидно, чем больше при этом значение тока ΔI (чем шире область безыскровой работы), тем устойчивее коммутация машины при переходных режимах в эксплуатационных условиях.

Контрольные вопросы

1. Какие причины могут вызвать искрение на коллекторе?
2. Что такое коммутация?
3. Как оценивается степень искрения и какой балл считается допустимым у тяговых машин?
4. Какие ЭДС наводятся в коммутируемой секции, каковы их природа возникновения и различие?
5. Что такое прямолинейная коммутация, почему ее называют безыскровой? Какова при этом реактивная ЭДС?
6. Что такое замедленная и ускоренная коммутация, почему для них характерно искрение под щеткой?
7. Почему целесообразно уменьшать реактивную ЭДС и как это можно делать?
8. Что такое коммутационная ЭДС, чем она наводится?
9. Для чего необходимы добавочные полюсы, какие требования предъявляются к их магнитной цепи?
10. Какую коммутацию целесообразно получить при настройке добавочных полюсов? Как определить их полярность?
11. Что такое зона коммутации, от чего она зависит, чем ограничивается?
12. Что такое круговой огонь; почему он может возникнуть; как предотвратить его появление?
13. Как можно настроить добавочные полюсы? Что характеризует ширина области безыскровой работы?

6.1. Способы возбуждения машин постоянного тока

Работа и свойства электрических машин постоянного тока (как генераторов, так и двигателей) в значительной степени зависят от способа возбуждения в них магнитного потока. Действительно, магнитный поток входит множителем как в выражение (3.25) ЭДС, так и в выражение (3.29) электромагнитного момента, поэтому необходимо знать, как создается магнитный поток, от каких величин он зависит, как и для какой цели нужно изменять его значение.

Согласно СТ СЭВ 169—75, по способу возбуждения машины постоянного тока классифицируют следующим образом:

а) *машины независимого возбуждения,* обмотка возбуждения которых питается от постороннего источника электрического тока;

б) *машины параллельного возбуждения,* обмотка возбуждения которых соединена параллельно с цепью якоря;

в) *машины последовательного возбуждения,* обмотка возбуждения которых соединена последовательно с цепью якоря;

г) *машины смешанного возбуждения,* у которых имеются две обмотки возбуждения, одна из которых соединена последовательно с цепью якоря (другая — может быть либо независимой, либо, чаще, параллельной). Если МДС обмоток возбуждения имеют одно направление, то такое их включение называется *согласным.* Если же МДС обмоток направлены в разные стороны, то включение называется *встречным.*

Схемы всех четырех типов машин показаны соответственно на рис. 6.1.

Все эти электрические машины имеют одинаковое устройство и отличаются лишь выполнением обмотки возбуждения (*ОВ*). Обмотки независимого и параллельного возбуждения изготавливают с большим числом витков, из провода малого сечения, а обмотку последовательного возбуждения — с малым числом витков из провода большого сечения.

Существуют также машины небольшой мощности, магнитное поле у которых создается либо только постоянными магнитами, либо еще и обмотками возбуждения, питаемыми электрическим током. Свойства первых близки к свойствам машин независимого, а вторых — смешанного или независимого возбуждения (в зависимости от способа подключения обмотки возбуждения).

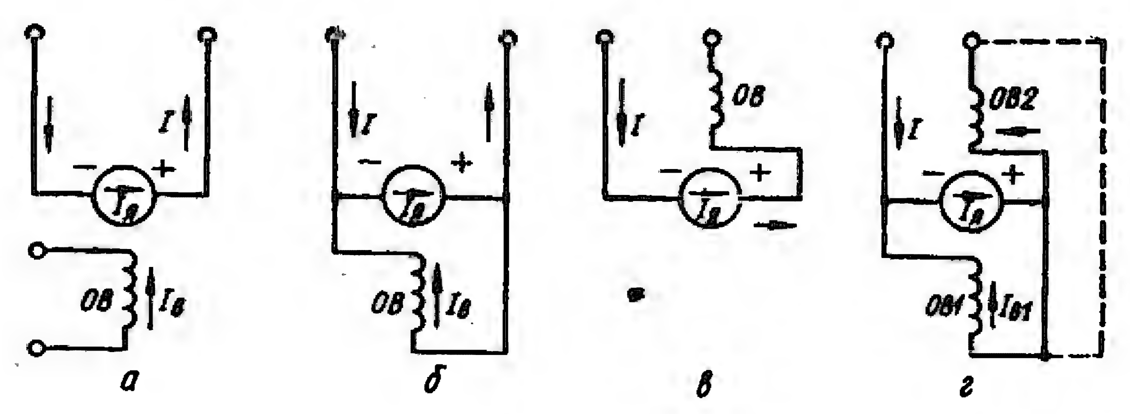


Рис. 6.1. Схемы электрических машин постоянного тока независимого (*а*), параллельного (*б*), последовательного (*в*) и смешанного (*г*) возбуждений

Во всех машинах на возбуждение расходуется от 0,5 % до 5 % номинальной мощности машины, причем первое значение относится к очень мощным машинам, а второе — к машинам мощностью около 1 кВт.

Как видно из рис. 6.1, значение тока возбуждения $I_в$ машины независимого возбуждения не зависит от тока якоря и определяется напряжением источника питания, причем для регулирования тока $I_в$ последовательно в цепь обмотки возбуждения включают резистор.

У машины параллельного возбуждения, согласно закону Ома,

$$I_в = U_г/(R_в + R_р), \quad (6.1)$$

где $R_в$ — сопротивление обмотки возбуждения, а $R_р$ — последовательно с нею включаемого регулировочного резистора.

У машин последовательного возбуждения $I_в = I_я$.

Согласно ГОСТ 2582—81, выводы всех обмоток маркируются следующим образом:

Я1 и Я2 — начало и конец обмотки якоря;

С1 и С2 — начало и конец последовательной (сериесной) обмотки возбуждения;

Ш1 и Ш2 — начало и конец параллельной (шунтовой) обмотки возбуждения;

К1 и К2 — начало и конец компенсационной обмотки;

Н1 и Н2 — начало и конец обмотки независимого возбуждения;

Д1 и Д2 — начало и конец обмотки добавочных полюсов.

Возможны случаи, когда машина имеет несколько обмоток одного наименования. В этом случае их начала и концы после буквенных обозначений должны иметь две цифры:

первая указывает порядковый номер обмотки, а вторая — начало (1) или конец (2). Например, начало второй параллельной обмотки возбуждения будет иметь обозначение Ш21.

6.2. Генератор независимого возбуждения

Характеристики генератора представляют собой графическое изображение зависимостей между основными величинами, определяющими его работу и свойства. Подробные схемы и объяснения по практическому снятию характеристик даны в соответствующих руководствах или указаниях по выполнению лабораторных работ. Здесь рассмотрим только вопросы принципиального характера.

Основными характеристиками генераторов постоянного тока являются характеристики холостого хода, нагрузочная, внешняя и регулировочная. Все они представляют собой различные функциональные зависимости при одном общем условии: частота вращения генератора $n = \text{const}$.

Характеристика холостого хода. Это зависимость ЭДС обмотки якоря при разомкнутой внешней цепи от тока возбуждения, т. е. $E_0 = f(I_в)$ при $I_я = 0$. При холостом ходе, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение на зажимах генератора равно ЭДС, т. е. $U_0 = E_0 = c_e n\Phi_0 = c_e'\Phi_0$ где $c_e' = c_e n$, поскольку $n = \text{const}$. Значит, напряжение U_0 зависит только от магнитного потока Φ_0, т. е. от тока возбуждения $I_в$. Поэтому характеристика $U_0 = E_0 = f(I_в)$, представленная кривой 1 на рис. 6.2, *а*, аналогична магнитной характеристике $\Phi_0 = f(I_в)$ на рис. 2.5.

Для снятия характеристик холостого хода вначале устанавливают ток возбуждения таким, чтобы $U_0 = (1{,}2 \div 1{,}25)\, U_{ном}$, затем уменьшают ток $I_в$ до нуля и вновь увеличивают до первоначального значения. При этом получаются нисходящая и восходящая ветви характеристики, выходящие из одной точки. Расхождение этих ветвей объясняется наличием гистерезиса (петля гистерезиса) в магнитопроводе машины. При $I_в = 0$ вольтметр зафиксирует «остаточное» напряжение (или ЭДС), равное 1—3 % от $U_{ном}$. Наличие $E_{ост}$ объясняется остаточным магнетизмом в стали полюсов.

Для практических целей используется не та или иная ветвь характеристики, а средняя линия, проведенная между ними. По ней судят о свойствах магнитной цепи машины, степени ее насыщения, некоторых технико-экономических показателях, как об этом уже говорилось в п. 2.3.

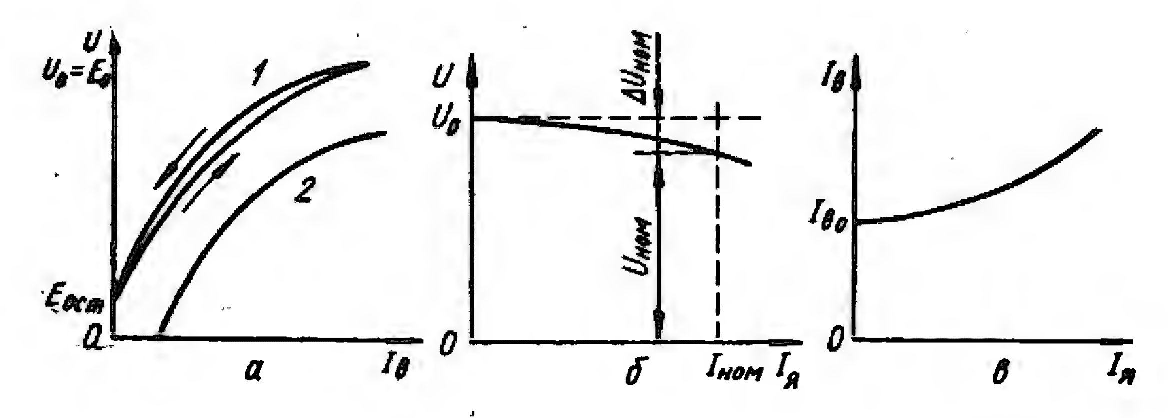


Рис. 6.2. Характеристики генератора независимого возбуждения

Нагрузочная характеристика. Это зависимость напряжения на выводах якоря генератора от тока возбуждения при неизменном токе нагрузки, т. е. $U_г = f(I_в)$ при $I_я = \text{const}$ (кривая *2* на рис. 6.2, *а*).

Напряжение на зажимах генератора всегда меньше ЭДС вследствие падения напряжения в якорной цепи и размагничивающего действия реакции якоря, поэтому нагрузочная характеристика располагается ниже и правее характеристики холостого хода.

Для снятия данной характеристики генератору сообщают номинальную частоту вращения, а затем, постепенно выводя регулировочный резистор в цепи возбуждения, повышают ЭДС до значения, превышающего номинальное напряжение на 10—15 %. После этого включают нагрузку и устанавливают номинальный ток в ней. При номинальных значениях тока и напряжения записывают значение тока возбуждения. Затем с помощью регулировочного резистора изменяют ток возбуждения и записывают несколько показаний амперметра в цепи возбуждения.

Как видно из графика, нагрузочная характеристика подобна характеристике холостого хода, потому что последняя является частным случаем нагрузочной характеристики, когда ток нагрузки равен нулю.

Знание нагрузочных характеристик необходимо для построения других характеристик, в том числе характеристик тормозных режимов локомотивов, когда их двигатели работают в генераторном режиме.

Внешняя характеристика. Это зависимость напряжения на выводах якоря генератора от тока нагрузки $U_г = f(I_я)$ (рис. 6.2, *б*) при неизменном токе возбуждения. В режиме нагрузки, согласно (В.10), $U_г = E - I_я R_я$, где в данном случае под $R_я$ следует понимать сопротивление всех обмоток, включенных последовательно в цепь якоря, т. е. са-

мого якоря, добавочных полюсов и компенсационной обмотки.

Как видно, при увеличении тока нагрузки напряжение $U_г$ уменьшается по двум причинам: 1) из-за падения напряжения во внутреннем сопротивлении $R_я$ машины и 2) из-за уменьшения ЭДС E в результате размагничивающего действия реакции якоря. Действительно, $E = c_e n\Phi$, но под воздействием реакции якоря магнитный поток Φ уменьшается (см. п. 4.3).

При снятии данных для построения внешней характеристики генератор нагружают до его номинального тока $I_{ном}$ при номинальном напряжении $U_{ном}$, а затем уменьшают нагрузку вплоть до напряжения холостого хода U_0 (при $I_я = 0$). Одновременно определяют *изменение напряжения* (при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу) в процентах

$$\Delta u_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100, \qquad (6.2)$$

которое составляет 5—15 %.

Регулировочная характеристика. Это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_в = f(I_я)$ при $U_г = \text{const}$ (рис. 6.2, *в*). Она показывает, каким образом следует регулировать ток возбуждения, чтобы поддержать постоянным напряжение генератора при изменении нагрузки.

Необходимость увеличения тока возбуждения для поддержания постоянства напряжения при росте нагрузки очевидна: нужно увеличить магнитный поток Φ, т. е. ЭДС E, чтобы напряжение оставалось всегда равным номинальному.

Регулировочную характеристику, как и все другие, можно снять, собрав схему на рис. 6.3. При токе якоря $I_я = 0$ устанавливают в цепи возбуждения такой ток $I_{в0}$, при котором напряжение на выводах генератора равно номинальному. Затем, увеличивая нагрузку, повышают ток возбуждения, сохраняя напряжение неизменным.

6.3. Условия самовозбуждения генераторов

Электрические машины, обмотки возбуждения которых (в отличие от независимого возбуждения) питаются током якоря самой машины непосредственно или через преобразовательное устройство (СТ СЭВ 169—75), получили название *машин с самовозбуждением.*

Процесс самовозбуждения генераторов параллельного и смешанного возбуждений происходит при разомкнутой

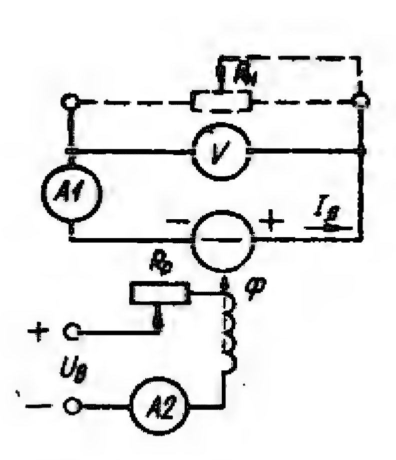


Рис. 6.3. Схема для снятия характеристик генератора независимого возбуждения

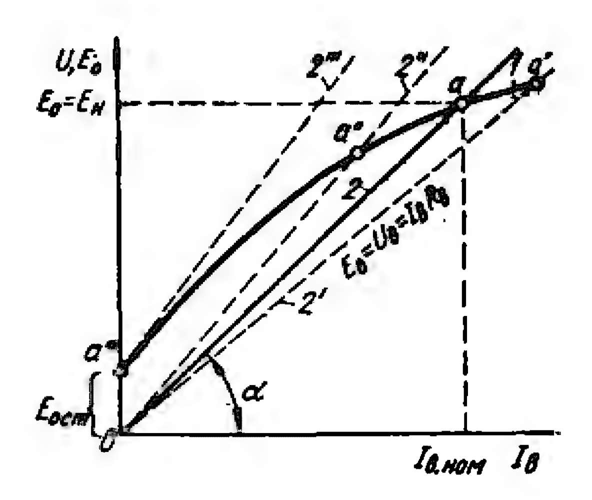


Рис. 6.4. Иллюстрация процесса самовозбуждения генераторов параллельного и смешанного возбуждений

внешней цепи за счет остаточного магнетизма в полюсах машины. Благодаря остаточному магнетизму при вращении якоря генератора в нем возбуждается остаточная ЭДС $E_{ост} = 0{,}02 \div 0{,}03 E_{ном}$. Цепь якоря в процессе запуска замкнута на цепь возбуждения, поэтому под действием остаточной ЭДС возникает ток возбуждения

$$I_в = E_{ост}/R_в, \tag{6.3}$$

где $R_в$ — сопротивление обмотки возбуждения.

Этот ток, протекая по обмотке возбуждения, усиливает магнитный поток полюсов (при условии согласного включения обмоток якоря и возбуждения), который наводит соответствующую ЭДС в обмотке якоря.

С увеличением ЭДС возрастают ток возбуждения и магнитный поток полюсов до установления номинального тока в цепи возбуждения. Процесс увеличения тока возбуждения прекращается, когда наступает равновесие падения напряжения на обмотке возбуждения и ЭДС на выводах генератора.

Процесс самовозбуждения генератора можно характеризовать зависимостью напряжения на обмотке возбуждения от тока возбуждения $U_в = f(I_в)$ при $R_в = \text{const}$ (кривая *1* на рис. 6.4). Эта кривая есть характеристика холостого хода генератора. При протекании тока по обмотке возбуждения на ней создается падение напряжения $U_в = I_в R_в$, которое изображается прямой *2* на рис. 6.4 (падением напряжения в цепи якоря можно пренебречь, так как сопротивление якоря $R_я$ значительно меньше сопротивления $R_в$ обмотки возбуждения).

В точке *а* пересечения линий *1* и *2* процесс самовозбуж-

дения прекращается, поскольку падение напряжения $U_в = I_в R_в$ на обмотке возбуждения уравновешивается ЭДС, наводимой в обмотке якоря, т. е. $I_в R_в = U_в = E_0$. В этом случае в обмотке возбуждения устанавливается постоянный ток, которому при $R_в \gg R_я$ соответствует постоянное напряжение на зажимах генератора.

Процесс самовозбуждения генератора может заканчиваться и при других положениях точки *a* на кривой *1*. Положение этой точки определяется углом наклона α прямой *2* к оси абсцисс, который зависит от сопротивления $R_в$ обмотки возбуждения. Чем меньше это сопротивление, тем при большем напряжении заканчивается процесс самовозбуждения (точка a' на кривой *1*) и наоборот (точка a'' на кривой *1*). Из графика видно, что, согласно закону Ома, сопротивление $R_в$ пропорционально $\operatorname{tg} \alpha$.

Если увеличивать $R_в$, то увеличится угол α, а точка *a* будет скользить по характеристике холостого хода в направлении к началу координат. При некотором сопротивлении $R_{в.кр}$, которое называется *критическим,* прямая *2* станет касательной к начальной части кривой *1* (точка a'''). При этом условии генератор не возбуждается.

6.4. Генератор параллельного возбуждения

Характеристику холостого хода этого генератора снимают опытным путем так же, как и генератора независимого возбуждения. Поскольку при холостом ходе генератора параллельного возбуждения в обмотке возбуждения и в якоре протекают одинаковые токи, т. е. $I_я = I_в$, а $I_в$ обычно не превышает 1—3 % номинального тока генератора, падение напряжения в цепи якоря и реакция якоря незначительны. Поэтому характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения практически совпадает с аналогичной характеристикой такого же генератора независимого возбуждения (кривая *1* на рис. 6.2, *а*).

Нагрузочная характеристика генератора параллельного возбуждения имеет такой же вид, как и генератора независимого возбуждения (кривая *2* на рис. 6.2, *а*).

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (кривая *1* на рис. 6.5), показывающая зависимость напряжения на его зажимах от тока нагрузки $U_г = f(I)$ при постоянных частоте вращения якоря ($n = \text{const}$) и сопротивлении обмотки возбуждения ($R_в = \text{const}$), отличается от аналогичной характеристики генератора независимого возбуждения (кривая *2* на рис. 6.5). Объясняется

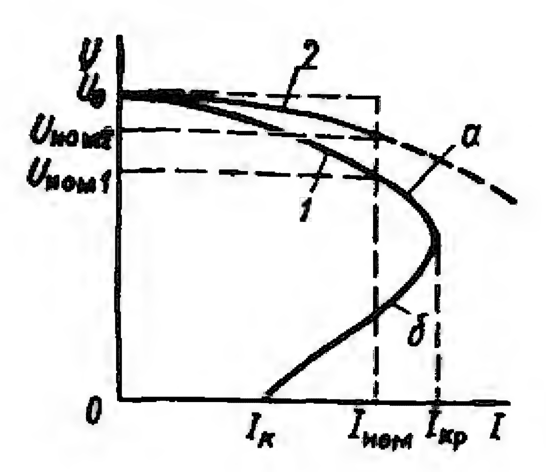


Рис. 6.5. Внешние характеристики генераторов параллельного (1) и независимого (2) возбуждений

это тем, что к двум причинам, вызвавшим уменьшение напряжения у генератора независимого возбуждения, здесь добавляется третья: уменьшение тока возбуждения, который согласно выражению (6.1) зависит от снижающегося в результате первых двух причин напряжения. Поэтому у генератора параллельного возбуждения напряжение при увеличении нагрузки уменьшается более интенсивно и при прочих равных условиях одному и тому же номинальному току $I_{ном}$ соответствуют разные значения номинальных напряжений (см. рис. 6.5).

Рассмотрение внешней характеристики (кривая 1 на рис. 6.5) показывает, что устойчивая работа генератора возможна только на верхней (*а*) ветви характеристики. При достижении тока в нагрузке, равного $I_{кр}$, генератор переходит на нижнюю (*б*) ветвь характеристики, где его работа становится неустойчивой. Мощность генератора при этом уменьшается и доходит до нуля в режиме короткого замыкания. Ток короткого замыкания в этом случае будет малым, что обусловлено малостью остаточной ЭДС генератора.

Такой вид характеристики объясняется тем, что с увеличением тока усиливается размагничивание генератора реакцией якоря, уменьшаются ток возбуждения и магнитный поток, машина переходит в ненасыщенное состояние, при котором даже небольшое уменьшение сопротивления нагрузки $R_н$ вызывает резкое уменьшение ЭДС машины (см. рис. 6.4). Ток нагрузки $I = U_г/R_н$, поэтому при $I < I_{кр}$, когда напряжение генератора уменьшается медленнее, чем убывает сопротивление $R_н$, происходит возрастание тока нагрузки. После того как $I = I_{кр} \approx (2 \div 2{,}5)\, I_{ном}$, дальнейшее уменьшение $R_н$ сопровождается уменьшением тока I, так как в этом случае напряжение $U_г$ убывает быстрее, чем уменьшается сопротивление $R_н$.

Ток короткого замыкания $I_к$ не только меньше $I_{кр}$, но $I_к < I_{ном}$. Из этого, однако, не следует, что генератор параллельного возбуждения не боится коротких замыканий. Ток $I_к$ на рис. 6.5 получен в результате постепенного уменьшения значения $R_н$. При внезапном коротком замыкании магнитная система генератора не успевает размагнититься

(изменение магнитного потока существенно запаздывает в сравнении с изменением тока) и ток $I_к$ достигает опасных значений; процесс изменения напряжения будет при этом характеризоваться кривой *2* на рис. 6.5, а $I_к = (8 \div 12)\ I_{ном}$.

Огромный ток вызовет, согласно выражению (3.29), значительный тормозной момент и в результате искажающего действия реакции якоря существенное повышение межламельного напряжения (см. п. 4.4), которое может явиться причиной возникновения кругового огня.

Номинальное изменение напряжения (6.2) у генератора параллельного возбуждения составляет $10 \div 30$ %. Иногда, чтобы уменьшить это значение, на полюсах устанавливают небольшую (2—3 витка) последовательную обмотку возбуждения, которая с ростом нагрузки увеличивает магнитный поток.

6.5. Генератор последовательного возбуждения

В этом генераторе (см. рис. 6.1, *в*) ток возбуждения равен току в якоре, т. е. току нагрузки $I_в = I_я = I$, и поэтому при постоянной частоте вращения имеются только две независимые переменные: напряжение $U_г$ и ток I. Следовательно, такой генератор имеет только одну характеристику — *внешнюю* $U_г = f(I)$. Ее вид может быть объяснен исходя из следующих соображений. При $n = \text{const}$ напряжение $U_г = c_e'\Phi - I_я R_я$. Если бы в генераторе последовательного возбуждения не было ни размагничивающего действия реакции якоря, уменьшающего поток Φ, ни падения напряжения в якорной цепи $I_я R_я$, то при увеличении тока нагрузки I магнитный поток изменялся бы согласно магнитной характеристике, и напряжение в точности соответствовало бы характеристике холостого хода (кривая *1* на рис. 6.2). В действительности существует и размагничивающее действие реакции якоря, и падение напряжения, которые уменьшают напряжение $U_г$, поэтому внешняя характеристика хоть и подобна кривой *1* на рис. 6.2, но пройдет ниже ее, причем разница между ними будет увеличиваться с ростом тока нагрузки. Когда сталь насытится и рост магнитного потока замедлится, а реакция якоря и падение напряжения будут продолжать расти с током I, напряжение может даже несколько уменьшиться: внешняя характеристика становится слабо спадающей.

Поскольку напряжение $U_г$ сильно изменяется при изменении нагрузки, а при холостом ходе оно близко к нулю,

генераторы последовательного возбуждения непригодны для питания большинства потребителей электроэнергии. Используют их лишь при электрическом торможении, когда двигатели последовательного возбуждения, переводятся в генераторный режим.

6.6. Генератор смешанного возбуждения

В этом генераторе (см. рис. 6.1, *г*) имеются две обмотки возбуждения: *основная* (параллельная) и *вспомогательная* (последовательная). Согласное включение двух обмоток позволяет получать приблизительно постоянное напряжение генератора при изменении нагрузки.

Внешняя характеристика генератора (рис. 6.6) может быть представлена в виде суммы характеристик, создаваемых каждой из обмоток возбуждения. При включении только одной параллельной обмотки, по которой проходит ток возбуждения $I_{в1}$, напряжение генератора постепенно уменьшается с ростом тока нагрузки I (кривая *1*). При включении одной последовательной обмотки, по которой проходит ток возбуждения $I_{в2} = I$, напряжение возрастает с увеличением тока I (кривая *2*). Подбирая число витков последовательной обмотки так, чтобы при номинальной нагрузке создаваемое ею напряжение $\Delta U_{посл}$ компенсировало суммарное падение напряжения ΔU при работе машины с одной только параллельной обмоткой, можно добиться, чтобы напряжение $U_г$ при изменении тока нагрузки от нуля до $I_{ном}$ оставалось почти неизменным (кривая *3*). Практически оно изменяется в пределах 2—3 %. Увеличивая число витков последовательной обмотки, можно получить характеристику, при которой напряжение $U_{ном} > U_0$ (кривая *4*); такая характеристика обеспечивает компенсацию падения напряжения не только в якорной цепи генератора, но и в линии, соединяющей его с нагрузкой. Если последовательную обмотку включить так, чтобы ее МДС была направлена против МДС параллельной обмотки (встречное включение), то внешняя характеристика генератора при большем числе витков последовательной обмотки будет крутопадающей (кривая *5*).

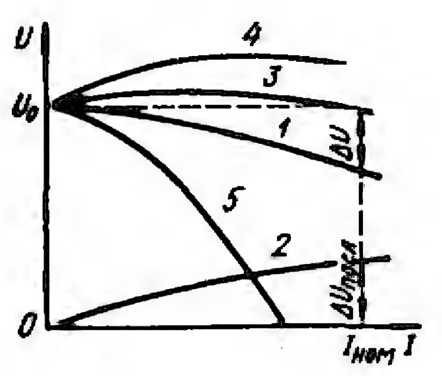


Рис. 6.6. Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения

Встречное включение последо-

вательной и параллельной обмоток возбуждения применяют в сварочных генераторах и других специальных машинах, где требуется ограничить ток короткого замыкания.

6.7. Параллельная работа генераторов

Параллельной работой генераторов называется такая их работа, когда два или несколько генераторов, подключенных к общим шинам одноименными зажимами, совместно работают на сеть, питая определенную группу потребителей.

В параллельной работе генераторов независимого и параллельного возбуждений существенных различий нет.

На рис. 6.7 показана схема включения генератора *G2* на параллельную работу с генератором *G1*; при этом потребитель не должен иметь помех в своей работе, т. е. напряжение на его шинах должно быть неизменным и равным номинальному значению.

● Порядок включения генератора *G2* на параллельную работу следующий: 1) первичному двигателю генератора *G2* сообщают номинальную частоту вращения; 2) включают вольтметр *V3*, как показано на рис. 6.7, и замыкают однополюсный выключатель *SA2*. Если при этом показание вольтметра *V3* равно нулю, то это значит, что полярности шин и генератора *G2* одинаковы; если же показание вольтметра *V3* равно удвоенному напряжению на шинах, то полярности разные и надо менять местами зажимы генератора *G2*; 3) изменяя ток возбуждения генератора *G2*, уравнивают его напряжение с напряжением на шинах ($U_{G2} = U_ш$) и, замыкают выключатель *SA3*. При этом генератор окажется включенным параллельно генератору *G1*, однако он не отдает и не потребляет тока, так как его ЭДС уравновешивается напряжением на шинах. Для того чтобы перевести часть нагрузки генератора *G1* на генератор *G2*, сохранив при этом неизменным напряжение на шинах, ток возбуждения генератора *G1* необходимо уменьшить, а генератора *G2* — увеличить.

У каждого из параллельно работающих генераторов одинаковое напряжение и его можно записать в следующем виде:

$$U_г = E_1 - I_{я1}R_{я1} = E_2 - I_{я2}R_{я2}, \qquad (6.4)$$

где $E_1 = c_{e1}\Phi_1 n_1$; $E_2 = c_{e2}\Phi_2 n_2$.

После подключения генератора *G2* к шинам (см. рис. 6.7) его можно нагрузить током. Для этого нужно увеличить ЭДС генератора E_2, которая станет больше $U_ш$, в результате чего в якоре генератора *G2* появится ток $I_{я2}$ [см. выражение

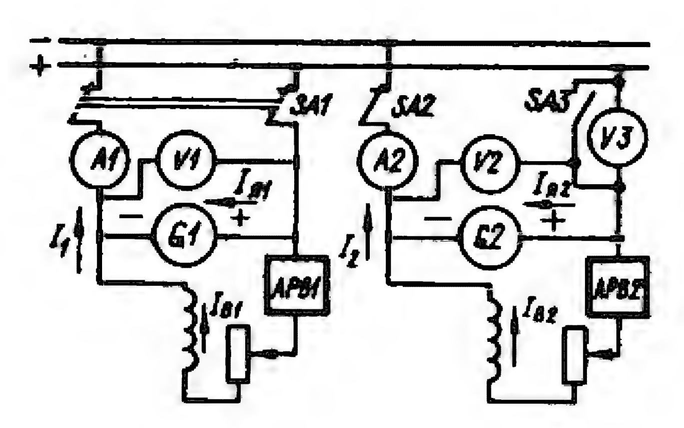


Рис. 6.7. Схема включения на параллельную работу генераторов параллельного возбуждения

Рис. 6.8. Распределение токов между генераторами при нагрузке

(6.4)]. Тогда при неизменном токе нагрузки ток $I_{я1}$ уменьшится. Если ЭДС E_1 останется постоянной, то разность $(E_1 - I_{я1}R_{я1})$ уже не будет равна прежнему значению напряжения на шинах и напряжение $U_г$ увеличится. Поэтому для поддержания постоянства напряжения $U_г$ одновременно с увеличением ЭДС E_2 надо уменьшить ЭДС E_1.

Изменить значения E_1 и E_2 можно либо током возбуждения, о чем уже говорилось выше, либо изменением частоты вращения первичного двигателя. В обоих случаях у генератора и его первичного двигателя меняется мощность. На практике обычно изменяют ток возбуждения.

Если есть необходимость перевести нагрузку с генератора *G1* на генератор *G2*, то поступают следующим образом: уменьшают ток $I_{в1}$ и одновременно увеличивают ток $I_{в2}$ до тех пор, пока ток I_1 не станет равным нулю, после чего генератор *G1* можно отключить от сети. При значительном уменьшении тока $I_{в1}$ ЭДС E_1 может оказаться меньше напряжения $U_г$. Это значит, что токи $I_{я1}$ и I_1 изменили свой знак [см. выражение (6.4)], т. е. свое направление. При этом генератор *G1* станет работать в режиме двигателя, потребляя энергию от генератора *G2*, что недопустимо, так как возможна авария первичного двигателя.

Следует иметь в виду, что вследствие малости сопротивлений $R_{я1}$ и $R_{я2}$ даже небольшие изменения токов $I_{в1}$ и $I_{в2}$ могут вызвать значительные изменения токов генераторов, поскольку, согласно выражению (6.4), изменения ЭДС E_1 и E_2 при $U_г = \text{const}$ должны компенсироваться изменениями падений напряжений в якорях машин $I_{я1}R_{я1}$ и $I_{я2}R_{я2}$. Поэтому регулирование токов возбуждения генераторов должно производиться достаточно плавно. В условиях эксплуатации такое регулирование осуществляют автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) генераторов.

Когда генераторы работают параллельно без устройств АРВ, то распределение нагрузок между ними зависит от вида их внешних характеристик: если эти характеристики подобны, нагрузки распределяются пропорционально номинальным мощностям генераторов, что наиболее выгодно; если же внешние характеристики не подобны, то генератор, имеющий более «мягкую» внешнюю характеристику (кривая *1* на рис. 6.8), нагружается меньшим током, чем другой генератор, у которого более «жесткая» внешняя характеристика (кривая *2* на рис. 6.8).

При параллельной работе генераторов смешанного возбуждения их обмотки последовательного возбуждения соединяют между собой уравнительным проводом, благодаря которому последовательные обмотки будут включены параллельно. Если теперь ЭДС какого-нибудь генератора неожиданно увеличится и он примет на себя часть нагрузки, то возросший в цепи его якоря ток увеличит ток в последовательной обмотке возбуждения другого генератора. Магнитный поток этого генератора возрастает, его ЭДС тоже увеличится, и нагрузки вновь автоматически распределятся между генераторами пропорционально их мощностям.

6.8. Тахогенераторы

Тахогенераторы представляют собой маломощные электрические генераторы постоянного тока мощностью 10—50 Вт и служат для преобразования частоты вращения в электрические сигналы (напряжение U) в системах автоматики и для измерения частоты вращения валов различных механизмов. На тепловозах с электрической передачей они используются в цепи автоматического регулирования мощности дизеля и в цепи главного генератора.

Как правило, тахогенераторы являются двухполюсными машинами независимого возбуждения или с возбуждением постоянными магнитами генерируют напряжение 3—5 В с частотой вращения до 1000 об/мин и 12—110 В с частотой вращения до 10 000 об/мин. Точность работы их определяется постоянством сопротивления нагрузки, линейной зависимостью выходного напряжения от частоты вращения якоря $U = f(n)$ и крутизной выходного напряжения, которая выражается в вольтах на 1000 об/мин. Номинальная крутизна выходного напряжения тахогенераторов общего применения около 50 В на 1000 об/мин.

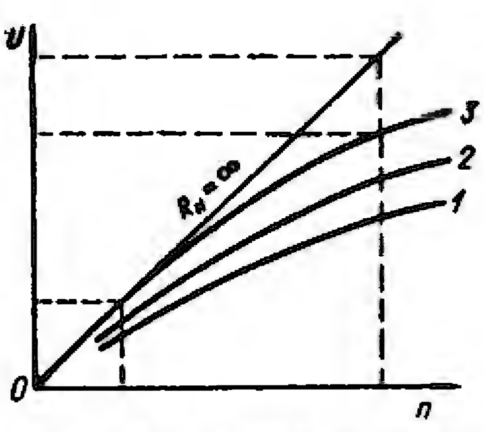


Рис. 6.9. Характеристики тахогенератора

Нагрузкой тахогенераторов являются таховольтметры или цепи обратной связи устройств автоматики, которые потребляют ничтожно малый ток. Нагрузку таких элементов электрических цепей удобно выражать не в амперах, а в омах.

Установим зависимость между выходным напряжением, частотой вращения и нагрузкой тахогенераторов. Согласно выражению (В.10), ЭДС тахогенератора

$$E = U + I_я R_я,$$

где $U = I_н R_н$ — выходное напряжение тахогенератора на зажимах нагрузки; $R_н$ — сопротивление нагрузки тахогенератора; $I_н$ — ток нагрузки тахогенератора.

Следовательно,

$$E = U(1 + I_я R_я / U) = U(1 + I_н R_я / I_н R_н) = U(1 + R_я / R_н). \quad (6.5)$$

Ввиду ничтожно малого тока якоря тахогенератора можно пренебречь размагничивающим действием реакции якоря и считать магнитный поток $\Phi = \text{const}$. Тогда ЭДС $E = c_e n \Phi = c'_e n$, где $c'_e = c_e \Phi$. С учетом этого напряжение из (6.5)

$$U = \frac{E}{1 + R_я/R_н} = \frac{c'_e n}{1 + R_я/R_н} = cn, \quad (6.6)$$

где постоянная c объединила все постоянные величины.

Выражение (6.6) представляет собой уравнение прямой, где постоянная c характеризует угол наклона прямой к оси абсцисс, т. е. крутизну характеристики выходного напряжения. Таким образом, при постоянной нагрузке $R_н$ сохраняется пропорциональность между выходным напряжением тахогенератора и частотой его вращения, причем чем больше сопротивление нагрузки, тем больше крутизна прямой выходного напряжения.

Практически вследствие реакции якоря и падения напряжения в его цепи линейная зависимость выходного напряжения нарушается, что снижает точность работы тахогенератора. Следовательно, сопротивление нагрузки нужно выбирать как можно больше.

Для иллюстрации сказанного на рис. 69 изображены характеристики зависимости выходного напряжения $U =$

$= f(n)$ для трех различных нагрузок тахогенератора: 2000, 5000 и 10 000 Ом (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Из рисунка видно, что чем больше $R_н$, тем круче характеристики, тем более прямолинейной является зависимость напряжения от частоты вращения якоря тахогенератора и тем, следовательно, больше его точность.

Контрольные вопросы и задача

1. Как классифицируются электрические машины постоянного тока по способу возбуждения?
2. Как маркируются выводы различных обмоток машин постоянного тока?
3. Какие характеристики определяют свойства генераторов постоянного тока?
4. Что такое номинальное изменение напряжения, чем оно вызвано и почему у генератора параллельного возбуждения оно больше, чем у генератора независимого возбуждения?
5. Какие условия необходимы для самовозбуждения генераторов постоянного тока?
6. Как изменяется напряжение генератора последовательного возбуждения при росте тока нагрузки?
7. Как могут включаться обмотки возбуждения генератора смешанного возбуждения и какой вид в зависимости от этого имеют его внешние характеристики?
8. Какие условия должны быть соблюдены при подключении генератора на параллельную работу? Как перевести нагрузку с одного генератора на другой?
9. Что такое тахогенератор, для чего он применяется?
10. Генератор параллельного возбуждения имеет напряжение $U_г = 230$ В при токе нагрузки $I = 220$ А. Определить ток его якоря $I_я$ и полезную мощность, если сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 37$ Ом.

Глава 7. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

7.1. Основные понятия и уравнения

Свойства двигателей. Как выяснено в п. В. 4, любая электрическая машина энергетически обратима, т. е. может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, уравнениями равновесия напряжения и моментов которого являются выражения (В.14) и (В.15). Все свойства двигателя могут быть изучены при помощи трех основных величин, связанных следующими выражениями:

а) подведенное напряжение (уравновешивается противо-ЭДС в якоре и внутренним падением напряжения)

$$U = E + I_я \Sigma R, \qquad (7.1)$$

где $\Sigma R = R_я + R_{д.п} + R_{к.о}$ — сумма сопротивлений якоря, добавочных полюсов и компенсационной обмотки;

б) наводимая в якоре противо-ЭДС E (в дальнейшем будем называть ее просто ЭДС; по закону Ленца она направлена против тока якоря)

$$E = c_e n \Phi; \tag{7.2}$$

в) электромагнитный вращающийся момент

$$M = c_M I_я \Phi. \tag{7.3}$$

Индекс «эм» у буквы M здесь и далее для простоты опущен. Отсюда видно, что изменение направления вращающего момента *(реверсирование двигателя)* возможно путем изменения направления тока якоря либо магнитного потока. Практически это выполняют переключением выводов обмотки якоря либо полюсов. Но не одновременно!

Из выражения (7.1) следует, что ток якоря

$$I_я = (U - E)/\Sigma R. \tag{7.4}$$

Разница в значениях U и E невелика; обычно $E = (0{,}92 \div 0{,}97)\, U$, причем бóльшая величина относится к машинам большей мощности.

Подставив (7.2) в уравнение (7.1), решим его относительно частоты вращеня; тогда

$$n = \frac{U - I_я \Sigma R}{c_e \Phi}. \tag{7.5}$$

Работа и свойства двигателей, определяемые этими выражениями, зависят от способа его возбуждения. Так, машины независимого и параллельного возбуждений, подключенные к сети с постоянным напряжением U, могут переходить из генераторного режима в двигательный и наоборот.

Действительно, как следует из выражения (7.4), если $E > U$ (увеличена частота вращения n), то ток $I_я$ изменит свое направление (знак), т. е. машина перейдет в генераторный режим. При этом электромагнитный момент, согласно (7.3), противоположен направлению вращения, т. е. станет тормозным. Таким образом, изменяя значение E (больше или меньше U), машину независимого или параллельного возбуждения можно переводить соответственно в генераторный или двигательный режим.

О машине последовательного возбуждения будет сказано ниже.

Равновесие моментов и мощностей. Взаимообратное преобразование электрической и механической энергии, согласно закону сохранения энергии, не может происходить без

потерь последней. Потери энергии выделяются в машине в виде теплоты и представляют собой разницу между подведенной к двигателю электрической энергией и механической энергией, им отдаваемой. Их соотношение определяет коэффициент полезного действия (КПД).

При установившемся режиме работы на валу двигателя действуют следующие моменты: 1) вращающий электромагнитный момент M; 2) момент холостого хода M_0; 3) полезный момент M_2.

Момент M_0 существует при любом режиме работы и определяется трением в подшипниках, щеток о коллектор, вращающихся частей о воздух, а также потерями в стали. По сравнению с номинальным полезным моментом величина M_0 очень мала.

Сумма моментов холостого хода и полезного носит название *статического момента* $M_{ст} = M_0 + M_2$. Значит, при установившемся режиме работы вращающий момент двигателя и статический момент сопротивления на его валу находятся во взаимном равновесии:

$$M = M_0 + M_2 = M_{ст}. \tag{7.6}$$

Если к двигателю подводится полная мощность $P_1 = UI_я$, то создаются потери в якорной цепи $I_я^2\Sigma R$ (потерями в параллельной обмотке возбуждения ввиду их малости пренебрежем); тогда с учетом выражения (7.1)

$$P_1 - I_я^2\Sigma R = UI_я - I_я^2\Sigma R = I_я(U - I_я\Sigma R) = EI_я = P_я, \tag{7.7}$$

но $P_я = P_{эм}$ [см. выражение (B.18)].

Известно, что мощность есть произведение момента на угловую скорость $\Omega = 2\pi n$. Поэтому, умножив все члены уравнения (7.6) на Ω, получим

$$M\Omega = M_0\Omega + M_2\Omega,$$

или

$$P_{эм} = p_0 + P_2 = P_я.$$

Отсюда полезная механическая мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_я - p_0, \tag{7.8}$$

т. е. полезная механическая мощность меньше электромагнитной (мощности якоря) на величину p_0, необходимую для покрытия потерь на трение и в стали.

Обозначив мощность потерь в якорной цепи $p_м = I_я^2\Sigma R$ и приняв во внимание уравнения (7.7) и (7.8), запишем полный баланс мощностей

$$P_2 = P_1 - p_м - p_0, \tag{7.9}$$

т. е. полезная мощность двигателя равна подведенной за вычетом мощности электрических потерь, потерь на трение и в стали.

Выражение (7.7) может быть записано в таком виде:

$$P_1 = P_я + I_я^2 \Sigma R = P_{эм} + I_я^2 \Sigma R,$$

откуда

$$UI_я = M\Omega + I_я^2 \Sigma R, \qquad (7.10)$$

или

$$(U - I_я \Sigma R) I_я = M\Omega. \qquad (7.10,а)$$

Анализ выражений (7.10) и (7.10, а) позволяет сделать очень важные выводы, а именно: с увеличением нагрузки на вал двигателя, т. е. с увеличением электромагнитного момента M возрастает мощность в цепи якоря $UI_я$, т. е. подводимая мощность P_1. Но так как напряжение $U = \text{const}$, то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока $I_я$. *Этот рост тока, т. е. увеличение подводимой электрической энергии, происходит автоматически, без какого-либо вмешательства извне.* Электрический двигатель сам «регулирует» потребление из сети такого тока, чтобы сохранялись равенства (7.10) и (7.10, *а*). Этим он принципиально отличается от других видов двигателей (паровых или внутреннего сгорания).

Основные характеристики. Свойства двигателей определяются их характеристиками, показывающими взаимозависимости между различными величинами в выражениях (7.1) — (7.5). Таких рабочих характеристик несколько и все они имеют одну общую особенность: они снимаются при неизменном, как правило, номинальном напряжении на выводах двигателя, т. е. подведенное напряжение $U = \text{const}$; ток возбуждения при этом также является неизменным и номинальным, т. е. $I_в = I_{в.ном}$.

Согласно ГОСТ 2582—81, основными рабочими характеристиками электрических двигателей являются:

а) зависимость частоты вращения от тока якоря — скоростная характеристика;

б) зависимость вращающего момента от тока якоря — моментная характеристика;

в) зависимость между вращающим моментом и частотой вращения — механическая характеристика;

г) зависимость КПД на валу двигателя от тока якоря.

Вид и особенности последней характеристики одинаковы для всех электрических машин и трансформаторов, поэтому ее анализ дан в п. 13.2.

Другие характеристики имеют подчиненное значение, не являются столь определяющими и могут быть получены из названных четырех.

В практике очень важно уметь определить вращающий момент двигателя $M = P_я/\Omega = P_2/(2\pi n)$. Если мощность выражена в ваттах, а угловая скорость — в рад/с (или частота вращения в об/с), то момент выразится в ньютон-метрах (Н · м):

$$M = 0{,}159 P_2/n. \qquad (7.11)$$

Часто частоту вращения выражают в об/мин; тогда

$$M = 9{,}55 P_2/n. \qquad (7.11,а)$$

7.2. Пуск двигателей в ход

Представим себе, что для тягового двигателя ДТ9Н (тяговый агрегат ПЭ2М), сопротивление якорной цепи которого $\Sigma R = 0{,}2$ Ом, при номинальном напряжении $U_{ном} = 1500$ В применен прямой пуск в ход, т. е. прямо на выводы двигателя подано номинальное напряжение. В момент подачи напряжения $n = 0$; значит, согласно (7.2), и $E = 0$. В таком случае уравнение (7.4) для момента прямого пуска примет вид

$$I_{я.пуск} = U/\Sigma R = 1500/0{,}2 = 7500 \text{ А}.$$

В то же время номинальный ток этого двигателя, согласно (7.4),

$$I_{я.ном} = \frac{U - 0{,}96U}{\Sigma R} = \frac{1500 - 0{,}96 \cdot 1500}{0{,}2} = 300 \text{ А}.$$

Таким образом, пусковой ток в данном случае превзошел номинальный в 25 раз; у различных машин он может превосходить номинальный в 10—30 раз. Такой ток вызовет появление огромных вращающего момента (7.3) и реактивной ЭДС (5.18), что создаст опасность поломки вала и приведет к сильному искрению под щетками.

По этой причине прямой пуск двигателей недопустим. Исключение составляют микромашины, в которых сопротивление ΣR относительно велико.

Уменьшить пусковой ток можно, применив *реостатный пуск*, когда последовательно в цепь якоря включают пусковой реостат (рис. 7.1).

В этом случае, согласно (7.4),

$$I_{я.пуск} = \frac{U}{\Sigma R + r_{п.р}}. \qquad (7.12)$$

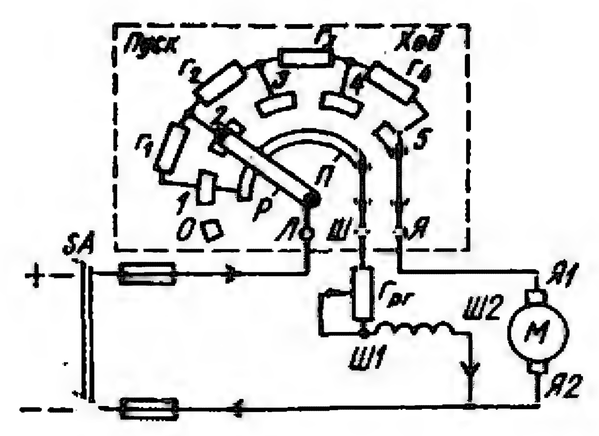


Рис. 7.1. Схема пуска двигателя параллельного возбуждения

Значение сопротивления пускового реостата $r_{п.р}$ выбирают таким, чтобы $I_{я.пуск} = (1,8 \div 2,5)\ I_{я.ном}$, т. е.

$$r_{п.р} = \frac{U}{(1,8 \div 2,5)\ I_{я.ном}} - \Sigma R.$$

По мере разгона двигателя вместе с частотой вращения n возрастает ЭДС E, ток якоря снижается и становится равным

$$I_я = \frac{U - E}{\Sigma R + r_{п.р}}. \qquad (7.13)$$

Для того чтобы пуск двигателя не был затяжным, ЭДС E должна нарастать как можно быстрее, а для этого магнитный поток и ток возбуждения должны быть максимальными.

Перед пуском двигателя необходимо рычаг *Р* реостата поставить на холостой контакт *О* (см. рис. 7.1). Затем включают рубильник, переводят рычаг на первый промежуточный контакт *1*, и цепь якоря двигателя оказывается подключенной к сети через резистор сопротивлением $r_{п.р} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$.

Одновременно через рычаг *Р*, планку *П* и контакт *Ш* к сети подключается обмотка возбуждения, ток в которой в течение всего периода пуска не зависит от положения рычага *Р*, так как сопротивление планки *П* по сравнению с сопротивлением обмотки возбуждения пренебрежимо мало.

Последовательность пуска следующая. Убедившись, что рукоятка пускового реостата находится в нулевом положении, а рукоятка регулировочного резистора $r_в$ в цепи возбуждения — в положении, при котором его сопротивление минимальное, надо замкнуть выключатель *SA* и перевести рукоятку пускового резистора из нулевого в первое положение, затем (по мере разгона двигателя) — плавно в следующие положения до полного выключения резистора (положение *5*). Процесс пуска закончен.

Для пуска двигателей последовательного возбуждения вместо трехзажимных реостатов используют двухзажимные (*Л* и *Я*), в которых сплошная медная планка отсутствует.

Описанный пуск является неэкономичным, особенно для двигателей средней и большой мощностей, ввиду громозд-

кости и дороговизны пусковых реостатов и, главное, из-за больших потерь энергии в них. Однако до настоящего времени он применяется на электровозах постоянного тока.

В современных устройствах, в том числе и на электровозах, применяют пуск путем *плавного повышения напряжения* на двигателе, начиная от минимального, выбираемого по значению допустимого пускового тока. Такое повышение напряжения выполняют с помощью специальных преобразовательных (тиристорных) устройств.

7.3. Двигатель параллельного возбуждения

В этом двигателе ток возбуждения не зависит от тока якоря, так как обмотка возбуждения подключена параллельно с обмоткой якоря к сети.

Скоростная характеристика $n = f(I_я)$. Ее вид определяется уравнением (7.5), которое в общем случае, когда в цепь якоря включен пусковой резистор сопротивлением $r_{п.р}$, имеет вид

$$n = \frac{U - I_я(\Sigma R + r_{п.р})}{c_e\Phi}. \qquad (7.14)$$

Напомним, что при неизменном токе возбуждения и пренебрежении размагничивающим действием реакции якоря магнитный поток $\Phi = \mathrm{const}$.

Разделим почленно числитель на знаменатель уравнения (7.14), тогда

$$n = \frac{U}{c_e\Phi} - \frac{I_я(\Sigma R + r_{п.р})}{c_e\Phi} = n_0 - \Delta n, \qquad (7.15)$$

где $n_0 = U/(c_e\Phi) = \mathrm{const}$ носит название *идеальной* частоты вращения при холостом ходе, потому что соответствует току якоря $I_я = 0$; $\Delta n = \frac{I_я(\Sigma R + r_{п.р})}{c_e\Phi}$ — уменьшение частоты вращения, обусловленное суммарным падением напряжения во всех резисторах якорной цепи.

Величина Δn, т. е. сумма $(\Sigma R + r_{п.р})$, определяет наклон скоростной характеристики, которая, как видно из уравнения (7.15), имеет линейный вид (рис. 7.2, *а*). Если резистора в якорной цепи нет ($r_{п.р} = 0$), то характеристика носит название *естественной* и имеет «жесткий» вид (характеристика *1* на рис. 7.2, *а*).

При наличии резистора в цепи якоря характеристики называются *искусственными* (линии *2* и *3*); их угол наклона возрастает (они становятся более «мягкими») с ростом значения $r_{п.р}$ (так, $r_{п.р3} > r_{п.р2}$).

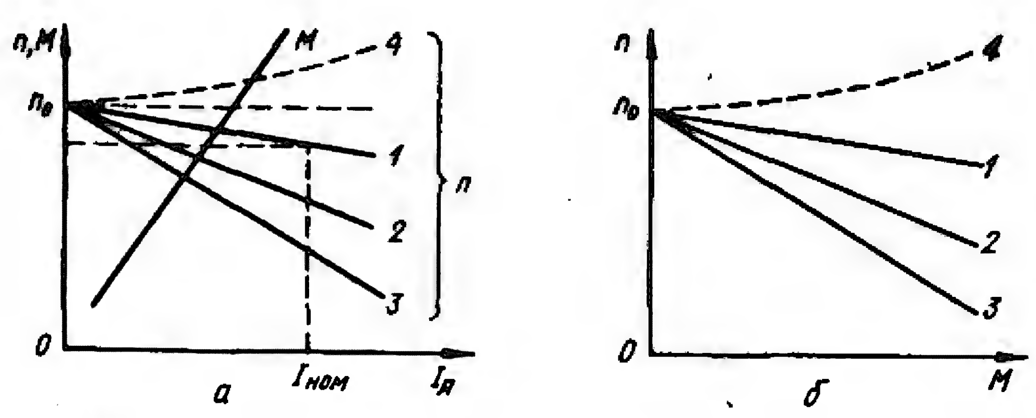


Рис. 7.2. Характеристики двигателя параллельного возбуждения

Уменьшение частоты вращения по естественной характеристике можно выразить в процентах: $\Delta n = \frac{n - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \times$ $\times\ 100$; обычно эта величина невелика и составляет $3 \div 5$ %.

Моментная характеристика $M = f(I_я)$. Эта характеристика может быть получена из уравнения (7.3) при условии $\Phi = \text{const}$. Тогда

$$M = c_M I_я \Phi = c'_M I_я, \qquad (7.16)$$

где $c'_M = c_M \Phi$ — постоянная.

Как видно, выражение (7.16) есть уравнение прямой линии. С ростом тока якоря вращающий момент линейно возрастает (см. рис. 7.2, *а*).

Механическая характеристика $n = f(M)$. Для получения ее аналитического выражения подставим в уравнение (7.15) значение тока из (7.3), т. е. $I_я = M/(c_M \Phi)$; тогда

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M(\Sigma R + r_{п.р})}{c_e c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n', \qquad (7.17)$$

где $\Delta n'$ — уменьшение частоты вращения, вызванное увеличением нагрузки на валу двигателя.

Как видно, уравнение (7.17) аналогично (7.15); поэтому механическая характеристика (рис. 7.2, *б*) по виду аналогична скоростной. Также имеются естественная (*1*) и семейство искусственных (*2*, *3*) характеристик, наклон которых зависит от значения $r_{п.р}$.

До сих пор мы рассматривали характеристики без учета размагничивающего действия реакции якоря, в результате которого магнитный поток Ф уменьшается. Обычно это уменьшение не очень велико, но может оказаться, что уменьшение знаменателя в выражениях (7.14) и (7.17) будет

происходить быстрее, чем уменьшение числителя (это касается естественной характеристики, когда $r_{п.р} = 0$). В этом случае возникает неприятное явление: с ростом нагрузки (тока $I_я$ и момента M) частота вращения будет также возрастать (штриховые линии *4* на рис. 7.2). Очевидно, этот процесс остановиться не может: чем больше частота вращения, тем больший вращающий момент развивает двигатель, что приводит к росту частоты вращения и т. д. В этом случае говорят, что двигатель идет «в разнос». Чтобы обеспечить скоростной и механической характеристикам спадающий характер, применяют *стабилизирующую* обмотку возбуждения, которая имеет два-три витка и включается последовательно в цепь якоря. Эта обмотка с ростом тока создает магнитный поток, компенсирующий размагничивающее действие реакции якоря.

Анализ характеристик на рис. 7.2 позволяет сделать вывод о том, что двигатели параллельного возбуждения следует применять в тех электроприводах, в которых при изменении нагрузки частота вращения должна поддерживаться практически неизменной.

7.4. Двигатель независимого возбуждения

В случае, если обмотка якоря двигателя и обмотка возбуждения подключены к источникам питания с различными напряжениями, его называют *двигателем независимого возбуждения*. Такие двигатели применяются в электрических приводах, где они питаются от генераторов или полупроводниковых преобразователей.

Механические и рабочие характеристики двигателя независимого возбуждения аналогичны характеристикам двигателя параллельного возбуждения, так как у них ток возбуждения $I_в$ также не зависит от тока якоря $I_я$ (см. п. 7.3).

7.5. Двигатель последовательного возбуждения

В этом двигателе обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря, т. е. $I_в = I_я$; поэтому магнитный поток Ф является некоторой функцией тока якоря (см. рис. 2.5).

Для дальнейшего изучения свойств двигателя целесообразно магнитную характеристику представить в виде трех участков: в начальной («ненасыщенной») части существует линейная зависимость $\Phi = f(I_я)$, т. е. $\Phi = c_\Phi I_я$ при $I_я < (0{,}8 \div 0{,}9)\ I_{я.ном}$; при очень больших нагрузках (правее

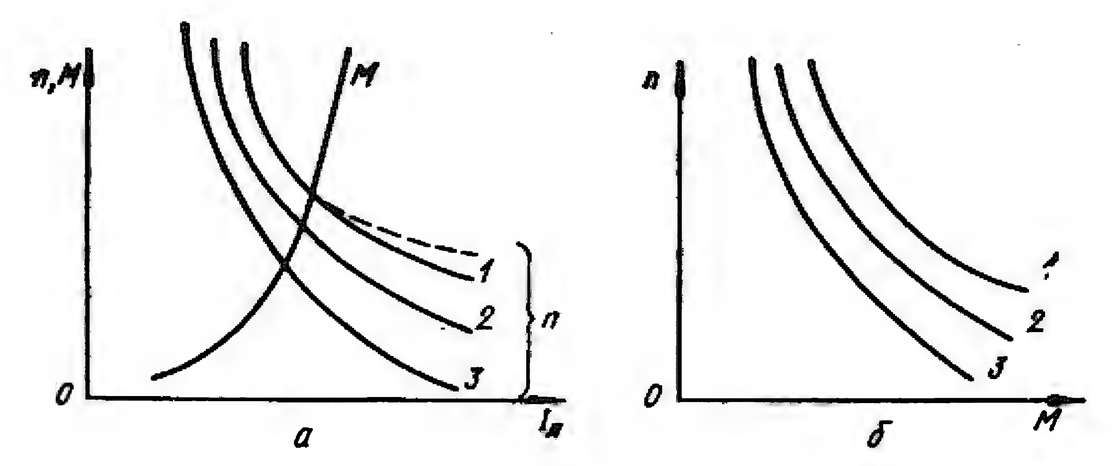


Рис. 7.3. Характеристики двигателя последовательного возбуждения

точки *c*) можно считать, что магнитный поток остается неизменным, т. е. $\Phi = \text{const}$; третий участок — переход от линейного «ненасыщенного» к «насыщенному», где между потоком Φ и током $I_я$ существует сложная нелинейная зависимость.

Скоростная характеристика $n = f(I_я)$. Будем считать, что магнитная цепь двигателя ненасыщена или насыщена очень слабо, т. е. $\Phi = c_\Phi I_я$. Подставим это значение магнитного потока в уравнение скоростной характеристики (7.5) и разделим почленно числитель на знаменатель; тогда

$$n = \frac{U}{c_e c_\Phi I_я} - \frac{\Sigma R}{c_e c_\Phi} = c_1 \frac{U}{I_я} - c_2, \qquad (7.18)$$

где c_1 и c_2 — постоянные.

Как видно, частота вращения обратно пропорциональна току нагрузки, т. е. выражение (7.18) есть уравнение гиперболы (кривая *1* на рис. 7.3, *а*). Это естественная скоростная характеристика. При больших токах, когда насыщается магнитная цепь и не существует прямой пропорциональности между магнитным потоком и током якоря, характеристика несколько отклоняется от гиперболы и «спрямляется» (штриховая часть кривой *1* на рис. 7.3, *а*).

Постоянная c_2 в уравнении (7.18) может различаться в зависимости от того, включен ли в цепь якоря резистор и каково его сопротивление $r_{п.р}$ [см. уравнение (7.14)]. Чем больше значение $r_{п.р}$, тем ниже расположены искусственные скоростные характеристики (кривые *2* и *3* на рис. 7.3, *а*).

Моментная характеристика $M = f(I_я)$. Эту характеристику целесообразно разделить на два участка: 1) при малых токах $I_я < (0{,}8 \div 0{,}9)\, I_{я.ном}$, когда $\Phi = c_\Phi I_я$; 2) при больших токах $I_я > I_{я.ном}$, когда можно считать $\Phi = \text{const}$.

На первом участке, согласно уравнению (7.3),

$$M = c_M c_\Phi I_я^2 \tag{7.19}$$

— вращающий момент пропорционален квадрату тока якоря, т. е. моментная характеристика имеет форму параболы (см. рис. 7.3, *а*). На втором участке справедливо уравнение (7.16), т. е. моментная характеристика становится линейной. Между параболической и линейной частями существует переходный участок, соответствующий третьему переходному участку магнитной характеристики.

Механическая характеристика $n = f(M)$. При построении этой характеристики также следует принять во внимание допущенное в начале этого параграфа разделение кривой намагничивания на три участка.

Для первого, «ненасыщенного», согласно (7.19), $I_я = \sqrt{\frac{M}{c_M c_\Phi}}$. Подставив это выражение в (7.18), получим уравнение естественной механической характеристики

$$n = c_1 \frac{U\sqrt{c_M c_\Phi}}{\sqrt{M}} - c_2 = c_1' \frac{U}{\sqrt{M}} - c_2, \tag{7.20}$$

где $c_1' = c_1\sqrt{c_M c_\Phi}$. Как видно, механическая характеристика имеет гиберболический вид (кривая *1* на рис. 7.3, *б*). При токах $I_я > I_{я.ном}$ зависимость $n = f(M)$ приближается к линейной.

Как и в уравнении (7.18), значение постоянной c_2 в (7.20) зависит от полного сопротивления якорной цепи: включен или нет резистор и каково его сопротивление $r_{п.р}$; чем оно больше, тем ниже расположены искусственные механические характеристики (кривые *2* и *3* на рис. 7.3, *б*).

Из рис. 7.3 следует, что скоростные механические характеристики двигателя последовательного возбуждения являются «мягкими», частота вращения при изменении нагрузки меняется в широком диапазоне. Из уравнений (7.18) и (7.20) следует, что если нагрузка стремится к нулю, то частота вращения стремится к бесконечности; при малых нагрузках она достигает недопустимо большого значения (двигатель идет «в разнос»), что может вызвать механическое разрушение якоря.

Поэтому двигатели последовательного возбуждения нельзя применять в электроприводах, где возможна саморазгрузка или холостой ход (станки, конвейеры и т. п.). Чтобы предотвратить саморазгрузку, двигатель соединяют с приводным механизмом зубчатой передачей или глухой муфтой.

В то же время способность двигателя последовательного возбуждения развивать момент $M \sim I_я^2$, тогда как у двигателя параллельного возбуждения $M \sim I_я$, делает применение первого желательным при тяжелых условиях пуска.

Согласно уравнениям (7.16) и (7.19), соответственно для двигателей параллельного и последовательного возбуждений соблюдается следующая пропорциональность:

$$I_{я.пр} \sim M; \quad I_{я.пс} \sim \sqrt{M}.$$

Полезная мощность двигателя $P_2 = M\Omega = M \cdot 2\pi n$. При жесткой механической характеристике ($n \approx \text{const}$) у двигателя параллельного возбуждения $P_{2пр} \sim M$; у двигателя последовательного возбуждения, для которого, согласно (7.20), $n \sim 1/\sqrt{M}$, $P_{2пс} \sim \sqrt{M}$.

Таким образом, **у двигателей последовательного возбуждения при изменении в широких пределах момента нагрузки** M **ток и мощность изменяются меньше, чем у двигателей параллельного возбуждения.**

Это обстоятельство чрезвычайно благоприятно сказывается на системе электроснабжения. Оно также означает, что *одну и ту же работу можно выполнить двигателем последовательного возбуждения меньшей мощности, чем двигателем параллельного возбуждения.*

Действительно, если для проведения по данному профилю пути состава поезда двигатель испытывает момент сопротивления (сопротивление движению), равный двойному номинальному, т. е. $M = 2M_{ном}$, то двигатель последовательного возбуждения будет потреблять из контактной сети ток $I_{я.пс} = \sqrt{2} I_{я.ном}$, а двигатель параллельного возбуждения — $I_{я.пр} = 2I_{я.ном}$; мощность первого может быть принята $\sqrt{2}/2 = 0{,}707$ необходимой мощности второго.

Эти свойства двигателей последовательного возбуждения позволяют применять их для тягового электропривода (электровозы, тепловозы, метро и т. п.) и в подъемно-транспортных установках.

7.6. Двигатель смешанного возбуждения

В этом двигателе магнитный поток создается в результате совместного действия последовательной и параллельной обмоток возбуждения, включаемых, как правило, согласно. Поэтому его механическая характеристика располагается между характеристиками двигателей последовательного и параллельного возбуждений (рис. 7.4). Она (кривая *3*) более

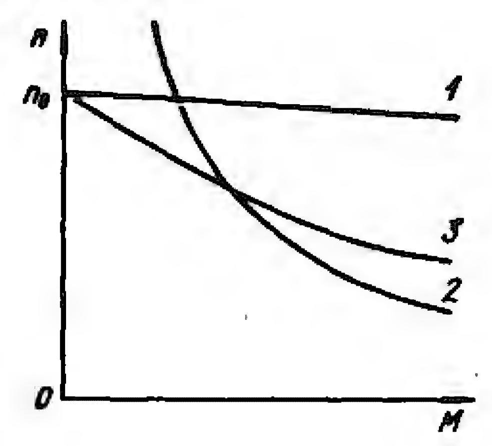


Рис. 7.4. Механические характеристики двигателей параллельного (*1*), последовательного (*2*) и смешанного с согласованным включением последовательной обмотки (*3*) возбуждений

мягкая, чем характеристика *1*, но более жесткая, чем *2*. В зависимости от соотношения МДС обеих обмоток кривая *3* может приблизиться к характеристике *1* или *2*. Тогда двигателю будут более или менее соответствовать свойства двигателя параллельного или последовательного возбуждения.

Одним из достоинств этого двигателя является то, что он не идет «в разнос» и может работать при холостом ходе (частота вращения n_0 имеет конечное значение). Это одна из причин, по которой двигатели смешанного возбуждения применяют на электроподвижном составе, например на троллейбусах и трамваях.

7.7. Регулирование частоты вращения

Работа двигателя на естественной характеристике не всегда может удовлетворить все требования эксплуатации. Часто бывает необходимо расширить рабочий диапазон, что может быть выполнено регулированием частоты вращения. Такое регулирование, согласно уравнению (7.14), можно выполнить тремя способами:

1) изменением питающего напряжения U;

2) изменением падения напряжения в цепи якоря, т. е. включением резистора в его цепь;

3) изменением магнитного потока Ф.

Все эти три способа дают принципиально одинаковые результаты для двигателей любого вида возбуждения, однако каждый способ при этом имеет свои характерные особенности.

Рассмотрим принципиальные особенности, свойственные этим способам регулирования, на примере двигателя последовательного возбуждения как имеющего основное применение в тяговом электроприводе.

Изменение питающего напряжения. Естественная скоростная характеристика (кривая *1* на рис. 7.3, *а*) соответст-

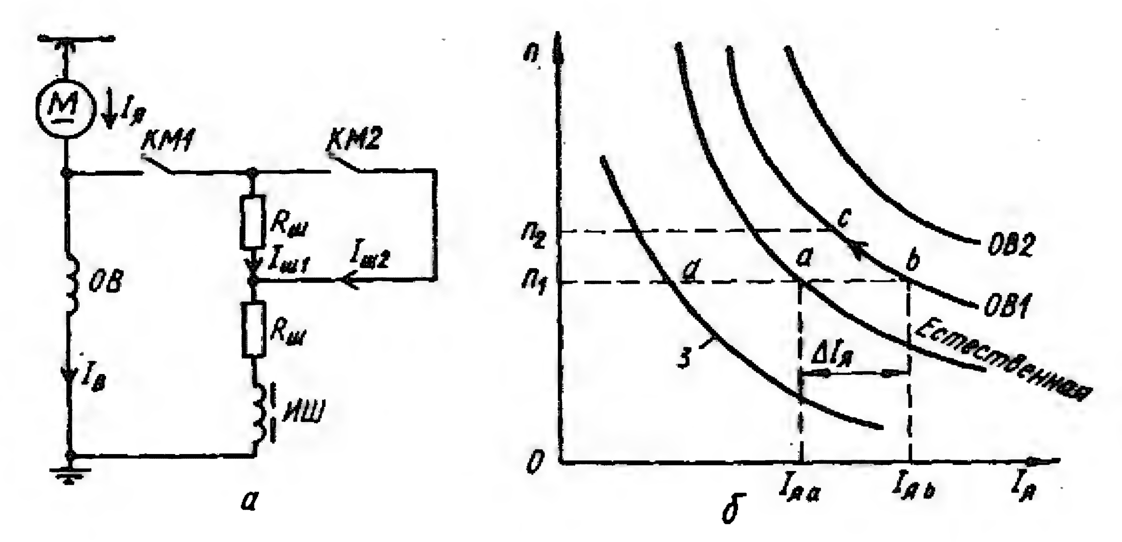


Рис. 7.5. Схема ослабления возбуждения (*а*) и скоростные характеристики (*б*) двигателя

вует номинальному напряжению; поэтому изменение питающего напряжения возможно только вниз, что даст семейство скоростных характеристик, аналогичных по форме естественной, но лежащих ниже.

Изменение питающего напряжения можно производить по схеме Г — Д (генератор — двигатель), когда к якорю регулируемого двигателя подводится напряжение от специального генератора. Такое регулирование имеет место на тепловозах. На электровозах плавное регулирование производят с помощью тиристорного преобразователя, а также главного трансформатора, изменяя ступенями его выходное напряжение.

Резистор в цепи якоря. Этот способ позволяет получить семейство скоростных или механических характеристик, лежащих ниже естественной. Каждая такая характеристика соответствует, согласно уравнению (7.14), своему значению $r_{п.р}$ (кривые *2* и *3* на рис. 7.3). Рассматриваемый способ регулирования обладает рядом недостатков: резистор, который должен быть рассчитан на длительное протекание по нему рабочего тока, оказывается громоздким и дорогим; кроме того, в резисторе теряется большая часть энергии, что делает данный способ регулирования неэкономичным.

Изменение магнитного потока. Может производиться в сторону его уменьшения — *ослабление возбуждения*, либо в сторону его увеличения — *усиление возбуждения*.

Ослабление возбуждения. Производится путем шунтирования обмотки возбуждения резистором (рис. 7.5, *а*). Когда замыкается контактор *КМ1*, часть тока якоря, определяемая значением сопротивления $R_ш$, ответвляется в цепь шунтирующего резистора; при этом ток возбуждения $I_в$, а зна-

чит, и магнитный поток Ф уменьшаются, а частота вращения n, согласно уравнению (7.5), возрастает. Чем меньше значение $R_ш$, тем большая часть тока ответвляется в шунтирующий резистор и тем больше возрастает частота вращения.

На рис. 7.5, *б* характеристика ослабленного возбуждения *ОВ1* получена при замыкании только контактора *КМ1*, когда значение сопротивления шунтирующего резистора равно $2R_ш$, а ток в шунтирующей цепи $I_{ш1}$.

При замыкании одновременно контакторов *КМ1* и *КМ2* (этому соответствует характеристика *ОВ2*) один резистор закорачивается, сопротивление шунтирующей цепи становится равным $R_ш$ и по ней течет ток $I_{ш2} > I_{ш1}$.

Рассмотрим процесс перехода с естественной характеристики на характеристику *ОВ1*.

Пусть двигатель работает на естественной характеристике (рис. 7.5, *б*) в точке *а*, что соответствует частоте вращения n_1 и току якоря $I_{яа}$. При замыкании контактора *КМ1* уменьшается магнитный поток Ф и, согласно (7.2), падает ЭДС двигателя E, так как благодаря инерции вращающихся масс частота вращения в первое время остается неизменной и равной n_1. Если уменьшилась ЭДС E, то для уравновешивания приложенного напряжения, как следует из уравнения (7.1), должен возрасти ток $I_я$; поэтому имеет место бросок тока на $\Delta I_я$ — ток становится равным $I_{яb}$, произошел переход в точку *b* на характеристике *ОВ1*.

При работе в точке *а* существовало равновесие между вращающим моментом двигателя и статическим моментом сопротивления на его валу [см. уравнение (7.6)]. Замыкание контактора *КМ1* вызывает большее приращение тока, чем уменьшение магнитного потока, поэтому вращающий момент двигателя (7.3) возрастает и становится больше момента сопротивления; это приводит к росту частоты вращения (по стрелке на характеристике *ОВ1*), уменьшению тока и вращающего момента. Частота вращения возрастает до некоторого значения n_2, пока в точке *с* вновь установится равновесие между вращающим моментом и статическим моментом сопротивления.

Переход на характеристику *ОВ2* происходит аналогично дополнительным замыканием контактора *КМ2*.

Последовательно в шунтирующую цепь включена индуктивность — индуктивный шунт. Его назначение — способствовать равномерному распределению токов $I_я$ и $I_ш$ в переходных режимах.

Описанный способ регулирования очень экономичен, так как суммарные потери на возбуждение даже уменьшаются.

Усиление возбуждения. Производится путем шунтирования якоря, что вызывает рост тока возбуждения и магнитного потока, а частота вращения падает (кривая *3* на рис. 7.5, *б*). При переходе на характеристику *3* (точка *d*) ток и вращающий момент уменьшаются, а значит, начинается движение по кривой *3* вниз.

Шунтирование якоря требует выполнения резистора на полное напряжение сети, что делает его очень громоздким и дорогим; его сопротивление должно быть большим, значит, потери энергии — значительны. Кроме того, шунтирование якоря эффективно лишь тогда, когда магнитная цепь двигателя не насыщена, поэтому такой способ регулирования на практике используется редко.

7.8. Электрическое торможение двигателей постоянного тока

Во всех исполнительных механизмах, где используется электрический привод, из соображений безопасности, как правило, применяют механический и электрический способы торможения. Механическое торможение основано на трении тормозных устройств о вращающиеся части привода, а электрическое — на создании в двигателе тормозного электромагнитного момента M, противоположного направлению вращения. Существуют три вида электрического торможения: рекуперативное, динамическое (реостатное) и противовключением.

Рекуперативное торможение. Оно является наиболее экономичным, так как основано на переводе двигателя в генераторный режим с отдачей энергии в сеть.

Двигатели параллельного или смешанного возбуждения могут автоматически переходить в режим рекуперативного торможения при частоте вращения больше $n_0 = U/(c_e\Phi)$ (см. рис. 7.4); характеристики продолжатся левее оси ординат, где вращающий момент является отрицательным. В этом случае ЭДС машины становится больше напряжения сети и ток, согласно (7.4), меняет свое направление.

Автоматический переход двигателя смешанного возбуждения в рекуперативный режим и его сравнительно «мягкие» механические характеристики обусловили его применение для целей электрической тяги на троллейбусах и трамваях (см. также п. 7.5). Можно перевести машину в рекуперативный режим и принудительно, уменьшив частоту вращения n_0 путем увеличения тока возбуждения (значит, Φ) или снижения подводимого напряжения U.

Двигатель последовательного возбуждения таким способом не может перейти в рекуперативный режим: его характеристика на рис. 7.4 не пересекает ось ординат, а ЭДС E никогда не может стать больше напряжения U. Дело в том, что $E = c_e n\Phi$, а $\Phi = c_\Phi I_я$ (ненасыщенная магнитная система) и, согласно (7.18), $n \sim 1/I_я$. Поэтому с ростом частоты вращения убывает ток якоря, а с ним и магнитный поток; следовательно, ЭДС E не увеличивается.

На электроподвижном составе двигатели последовательного возбуждения для перевода в рекуперативный режим изменением схемы включения превращают в генераторы независимого возбуждения.

Динамическое торможение. Осуществляется путем отключения якорной обмотки от сети и замыканием ее на тормозной резистор (реостат) сопротивлением $r_т$. При этом механическая энергия вращающихся масс преобразуется в электрическую, которая расходуется на нагрев тормозного резистора и других элементов цепи якоря.

Обмотка возбуждения двигателя параллельного возбуждения остается включенной в сеть той же полярности и, следовательно, ток возбуждения и магнитный поток остаются неизменными. Так как якорная обмотка отключена от сети, то ток, потребляемый двигателем из сети, равен нулю, но якорь двигателя по инерции продолжает вращаться, вследствие чего в нем наводится ЭДС $E = c_e n\Phi$.

Тормозной ток якоря, согласно (7.4),

$$I_{я.т} = \frac{0 - E}{\Sigma R + r_т} = -\frac{E}{\Sigma R + r_т}. \quad (7.21)$$

Изменение знака тока приводит к изменению знака момента, который из вращающего становится тормозным:

$$M_т = c_M I_{я.т}\Phi = c_M\left(-\frac{E}{\Sigma R + r_т}\right)\Phi = -c_e c_M \frac{n\Phi^2}{\Sigma R + r_т}. \quad (7.22)$$

Из выражения (7.22) видно, что при постоянном магнитном потоке Φ тормозной момент зависит от частоты вращения n, которая вследствие торможения убывает, и от сопротивления тормозного резистора $r_т$.

Для поддержания тормозного момента относительно постоянным тормозной резистор выполняют секционированным. По мере уменьшения частоты вращения якоря выводят секции тормозного резистора, уменьшая его сопротивление, и тем самым поддерживают ток и тормозной момент постоянными.

У двигателя последовательного возбуждения при динамическом торможении необходимо переключить выводы

обмотки возбуждения с тем, чтобы направление тока в ней, а значит, и магнитного потока осталось неизменным.

Торможение противовключением. Производится переключением выводов якорной обмотки либо обмотки возбуждения, вследствие чего изменяются направление тока в якоре либо магнитного потока и знак момента, который из вращающего превращается в тормозной. Ток якоря после переключения его обмотки становится равным

$$I_{я.т} = \frac{-U - E}{\Sigma R + r_т} = -\frac{U + E}{\Sigma R + r_т}, \qquad (7.23)$$

т. е. он не только изменяет свой знак, но и скачком сильно увеличивается, а с ним растет и тормозной момент. Такой скачок тока и тормозного момента может оказаться опасным для машины, если сопротивление $r_т$ мало.

Торможение противовключением обеспечивает быстрый останов двигателя. Однако при торможении этим способом двигатель должен быть своевременно отключен от сети во избежание вращения якоря в противоположном направлении (реверса). Данный способ торможения применяется в подъемно-транспортных механизмах при спуске груза и в других случаях, например для предотвращения аварийных ситуаций, опасных для жизни людей.

Контрольные вопросы и задача

1. Каким образом можно изменить направление вращающего момента двигателя, т. е. произвести его реверсирование?
2. Из уравнения равновесия напряжений выведите уравнение для тока якоря; как можно изменить его направление?
3. Какие моменты действуют на валу двигателя? Напишите уравнение их равновесия.
4. Почему рост нагрузки на валу сопровождается ростом тока якоря?
5. Каково назначение пускового резистора и из каких соображений выбирают его сопротивление?
6. Почему при пуске двигателей параллельного возбуждения сопротивление резистора в цепи обмотки возбуждения должно быть минимальным?
7. Как изменяется частота вращения двигателей разных систем возбуждения при увеличении нагрузки на валу?
8. Почему двигатели последовательного возбуждения нельзя включать в сеть без нагрузки на валу? Благодаря каким свойствам эти двигатели применяют в качестве тяговых и крановых?
9. Сравните, как изменяется потребление тока из сети (мощность) при изменении нагрузки на валу у двигателей параллельного и последовательного возбуждений. Чем ограничено значение максимального вращающего момента?
10. Какими способами можно регулировать частоту вращения двигателей постоянного тока?

11. Что такое режим ослабленного возбуждения и как он осуществляется у двигателей постоянного тока?
12. Какие существуют виды электрического торможения, в чем их особенности у двигателей различных систем возбуждения?
13. Мощность тягового двигателя ДТ9Н равна 467 кВт при частоте вращения 655 об/мин. Определить его вращающий момент.

Раздел второй
ТРАНСФОРМАТОРЫ

Глава 8. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТРАНСФОРМАТОРА

8.1. Назначение и области применения трансформаторов

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. При помощи трансформаторов повышают или понижают напряжение, изменяют число фаз и в некоторых случаях преобразуют частоту переменного тока. Трансформаторы широко используют для следующих целей.

1. *Для передачи и распределения электрической энергии.* Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6—24 кВ, передавать же энергию на дальние расстояния выгодно при значительно бóльших напряжениях (110, 220, 330, 400, 500 и 750 кВ). Поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, осуществляющие повышение напряжения.

Распределение электрической энергии между промышленными предприятиями, населенными пунктами, в городах и сельских местностях, а также внутри промышленных предприятий производится по воздушным и кабельным линиям при напряжении 220, 110, 35, 20 и 6 кВ. Следовательно, во всех узлах распределительных сетей должны быть установлены трансформаторы, понижающие напряжение. Понижающие трансформаторы также надо устанавливать в пунктах потребления электроэнергии, так как большинство электрических потребителей переменного тока работает при напряжениях 220, 380 и 660 В.

Таким образом, электрическая энергия при передаче от электрических станций к потребителям подвергается в трансформаторах многократному преобразованию (3—5 раз).

Трансформаторы, служащие для преобразования электрической энергии в сетях энергосистем и электропотребителей, называют *силовыми*. Мощность силовых трансформаторов достигает очень больших значений (до 1 млн. кВ · А), а напряжение — до 1150 кВ.

На электровозах силовые *тяговые* трансформаторы служат для снижения напряжения на токоприемнике до напряжения питания тяговых двигателей и других устройств. С их помощью производят ступенчатое изменение напряжения для пуска и регулирования режимов работы тяговых двигателей.

2. *Для обеспечения нужной схемы включения полупроводниковых преобразователей*, когда необходимо согласование напряжения на их входе и выходе. Такие трансформаторы называют *преобразовательными*.

3. Для различных технологических целей: сварки, питания электротермических установок и т. п.

4. *Для питания различных цепей теле- и радиоаппаратуры*, устройств связи и автоматики. Такие трансформаторы могут работать при очень больших частотах (до десятков килогерц).

5. *Для включения электроизмерительных приборов* — измерительные трансформаторы.

Трансформаторы могут быть *однофазными* или *трехфазными*, иметь две или больше обмоток.

Учитывая задачи настоящего курса, здесь основное внимание уделено однофазным силовым трансформаторам; другие виды трансформаторов рассматриваются кратко.

8.2. Принцип действия трансформатора

Как и у электрических машин, принцип действия трансформаторов основан на законе электромагнитной индукции, согласно которому при пересечении магнитным потоком токопроводящего витка в последнем наводится ЭДС, определяемая уравнением (В.2).

Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, собранного из листовой электротехнической стали (для уменьшения вихревых токов и потерь на гистерезис) и называемого *магнитопроводом*, и двух или более обмоток, насаженных на сердечник трансформатора (рис. 8.1). Обмотка, к которой подводится энергия, называется *первичной*;

она содержит w_1 витков и присоединяется к источнику напряжения U_1. Обмотка, от которой отводится энергия, называется *вторичной*; в ней содержится w_2 витков. К зажимам вторичной обмотки присоединяется нагрузка, полное сопротивление которой $Z_н$.

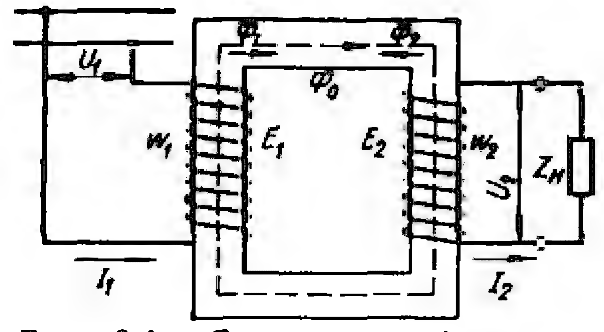


Рис. 8.1. Схема трансформатора

Условились обозначать начала обмотки высшего напряжения (ВН) прописными буквами латинского алфавита, A, B, а их концы — буквами X, Y; соответственно начала и концы обмотки низшего напряжения (НН) — строчными буквами a, b и x, y.

Таким образом, трансформатор, с одной стороны, является потребителем энергии, поскольку первичная обмотка присоединена к источнику, а с другой — источником энергии, так как ко вторичной обмотке присоединен потребитель энергии. Мощность трансформаторов, как и всех источников переменного тока, выражают в вольт-амперах (В · А) или киловольт-амперах (кВ · А). Выражать мощность источников переменного тока в ваттах или киловаттах нельзя потому, что их мощность непостоянна и зависит от коэффициента мощности потребителя.

При подключении к сети первичной обмотки в ней возникает переменный ток, который создает переменный магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводу. Поток Ф пересекает обе обмотки и наводит в них переменные ЭДС

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \tag{8.1}$$

Если подведенное первичное напряжение и ток синусоидальны, то, пренебрегая насыщением магнитопровода, можно считать синусоидальными также магнитный поток и наведенные ЭДС, т. е.

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \tag{8.2}$$

где Φ_m — амплитудное значение потока.

Подставив в (8.1) выражение (8.2), получим

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t =$$

$$= 2\pi f w_1 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2); \tag{8.3}$$

$$e_2 = 2\pi f w_2 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2). \tag{8.3,а}$$

Из полученных выражений видно, что e_1 и e_2 отстают по фазе от потока Ф на угол $\pi/2$. Действующие значения обеих ЭДС равны соответственно

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad (8.4)$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (8.4,а)$$

Если $w_1 > w_2$, то $E_1 > E_2$ и такой трансформатор называется *понижающим*. При обратном соотношении числа витков, а значит, и ЭДС, трансформатор будет *повышающим*.

Отношение первичной и вторичной ЭДС носит название *коэффициента трансформации*; с учетом выражений (8.4) он равен

$$k = E_1/E_2 = w_1/w_2. \quad (8.5)$$

Вне зависимости от того, повышающий трансформатор или понижающий, для определения коэффициента трансформации принимают отношение большего числа витков к меньшему, т. е. всегда $k > 1$.

Для простоты в дальнейшем будем рассматривать понижающий трансформатор, у которого обмотка ВН является первичной.

Если вторичная обмотка замкнута на нагрузку, то вместе с напряжениями в трансформаторе преобразуются и токи, мощность же остается приблизительно неизменной, так как потери энергии в силовых трансформаторах очень малы и составляют обычно не более 0,5—2 % мощности, т. е. $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$.

Следовательно, если не учитывать падение напряжения, то

$$I_2/I_1 \approx U_1/U_2 \approx E_1/E_2 = w_1/w_2 = k. \quad (8.6)$$

Таким образом, если при преобразовании энергии в трансформаторе подведенное напряжение уменьшилось в k раз, то ток приблизительно в k раз увеличился.

8.3. Устройство трансформаторов

Силовые трансформаторы могут быть маслонаполненными или сухими; их соответственное обозначение включает буквы М или С. Однофазный и трехфазный трансформаторы обозначают буквами О или Т.

Основными частями трансформатора являются магнитопровод, обмотки, бак, выводы, система охлаждения и др.

Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками является *активной* частью, а остальные элементы — *вспомогательными*.

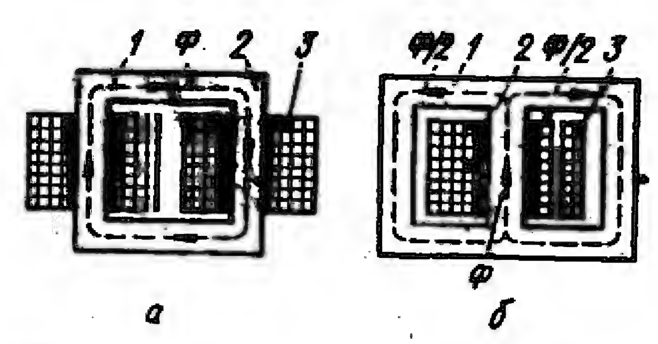


Рис. 8.2. Основные типы однофазных трансформаторов

В зависимости от конфигурации магнитопровода трансформаторы подразделяют на *стержневые* (рис. 8.2, *а*) и *броневые* (рис. 8.2, *б*). Магнитопровод состоит из стержней *2*, на которых размещают обмотки *3*; замыкающую часть *1*, на которой нет обмоток, называют ярмом.

Обмотки ВН и НН трансформаторов для лучшей магнитной связи между ними помещают на одном и том же стержне: одна внутри другой — *концентрические* (концентры) либо *чередующиеся*, когда части обмоток ВН и НН попеременно следуют друг за другом по высоте стержня (последние — это обычно броневые трансформаторы). При концентрическом исполнении обмоток у обычных трансформаторов обмотку НН помещают ближе к стержню (внутри обмотки ВН), так как в этом случае легче осуществить изоляцию от стержня.

У тяговых трансформаторов обмотка НН имеет большое число выводов, поэтому ее располагают поверх обмотки ВН.

Рассмотрим устройство однофазных тяговых трансформаторов (рис. 8.3 и 8.4), которые применяют на карьерных электровозах. Магнитопроводы тяговых трансформаторов выполняются шихтованными из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм. Все отечественные трансформаторы имеют сердечники стержневого типа. Магнитопровод с обмотками устанавливают в бак.

Бак трансформатора *6* (см. рис. 8.3) сваривается из листовой стали и закрывается крышкой *8*, прикрепляемой к нему через уплотнение из масломорозостойкой резины с помощью болтов. Выше уровня крышки устанавливается расширитель *1* с указателем уровня масла *2*. Масло является не только изолирующей, но и охлаждающей средой. В расширителе оно всегда холоднее, чем в баке, а поверхность его соприкосновения с воздухом очень мала, что предохраняет масло от окисления и увлажнения. Объем расширителя и уровень масла в нем рассчитываются так, чтобы при всех режимах работы и колебаниях температуры окружающей среды бак был заполнен маслом.

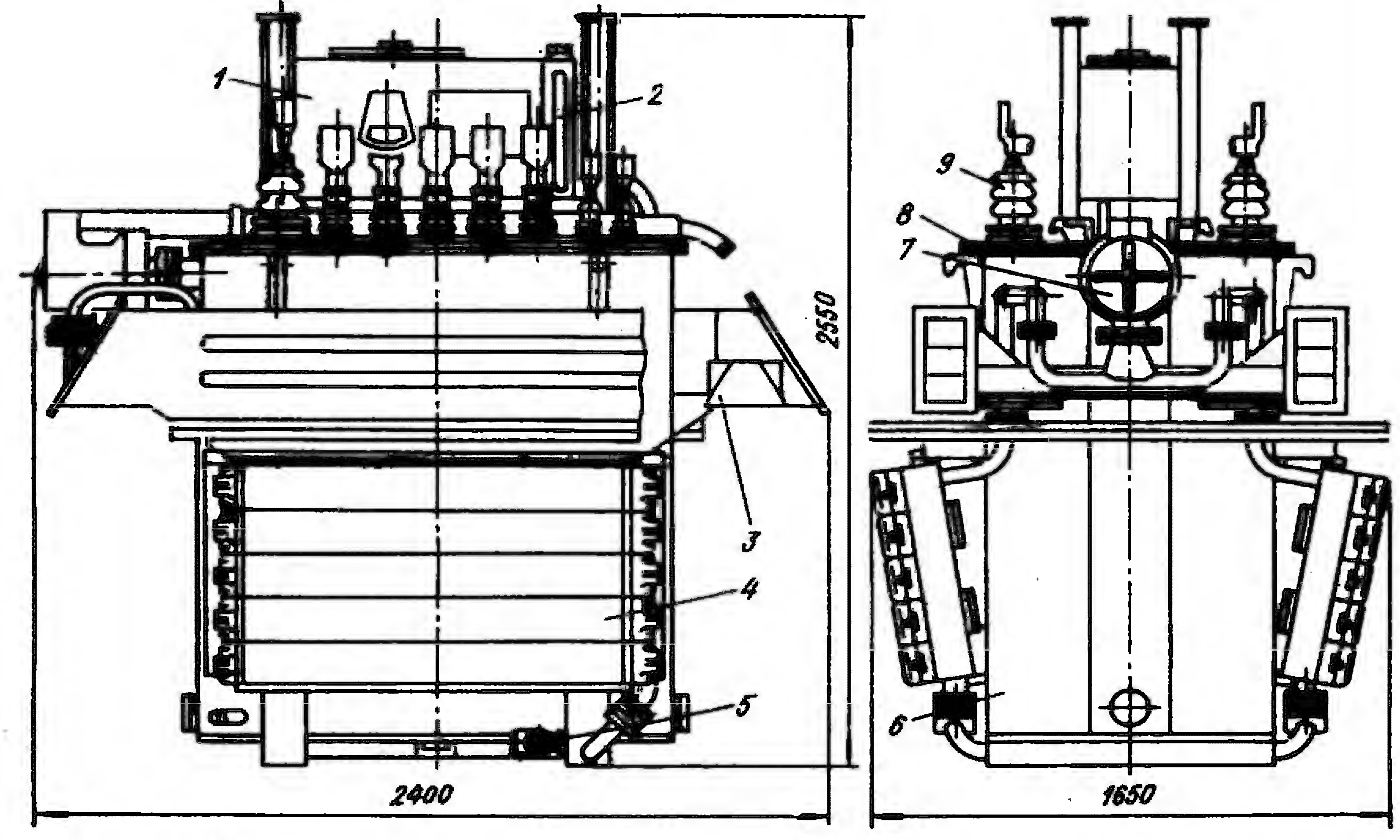


Рис. 8.3. Общий вид тягового трансформатора промышленного электровоза

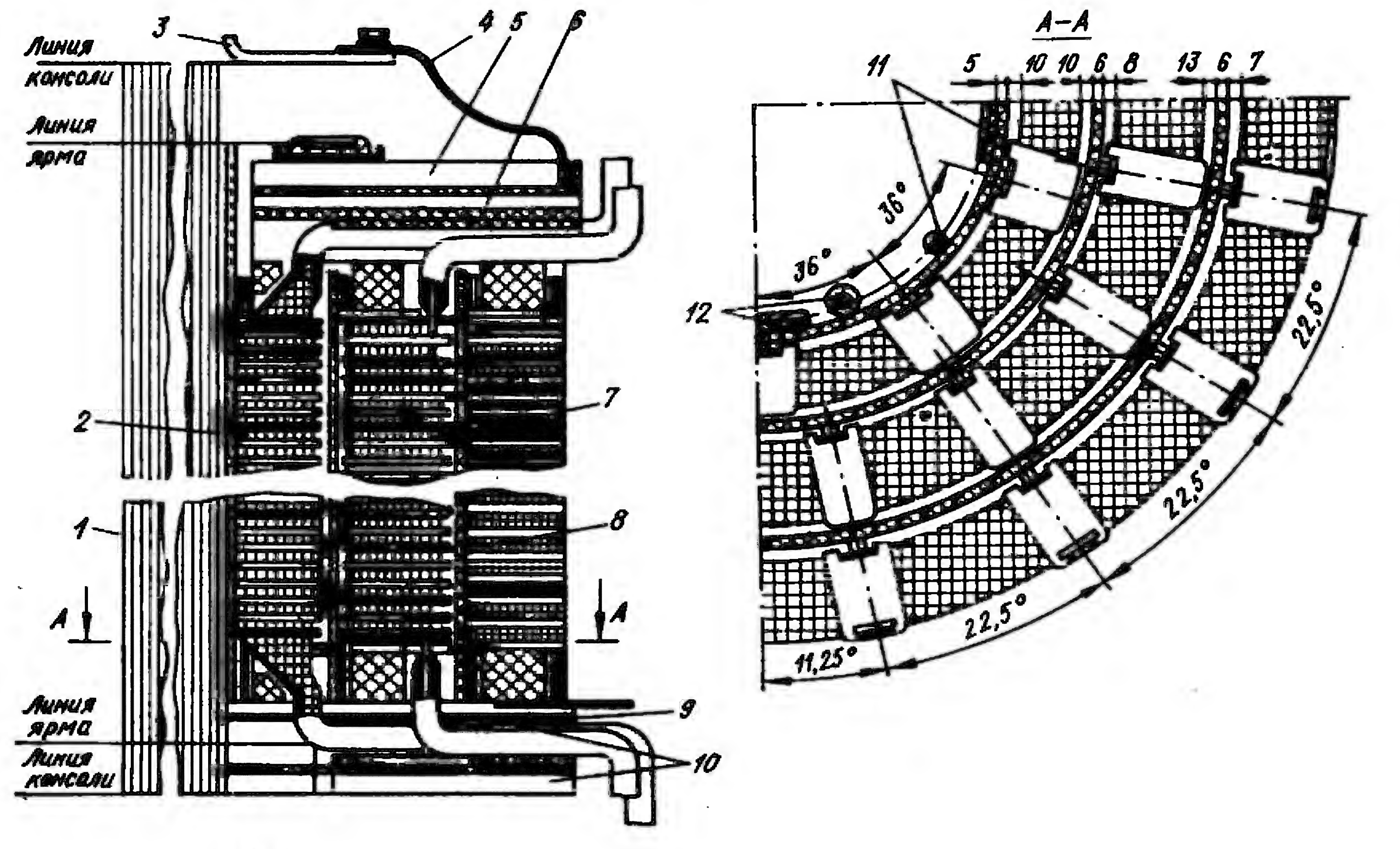


Рис. 8.4. Монтаж обмотки на стержне магнитопровода тягового трансформатора

Обмотки (см. рис. 8.4) наматываются медным проводом прямоугольного сечения, изолированным несколькими слоями кабельной бумаги и слоем хлопчатобумажной пряжи. Вход катушек высокого напряжения делается усиленным по изоляции. Расположенные концентрично обмотки изолируются одна от другой и от сердечника *1* бакелитовыми цилиндрами *11*. В обмотках, а также между ними и изоляционными цилиндрами с помощью реек, склеенных бакелитовым лаком из полос электротехнического картона, выполняются осевые каналы для охлаждения обмоток маслом. Остальными цифрами на рис. 8.4 обозначено: *2* — первые концентры; *3* — ярмовая балка; *4* — шина; *5* — кольцо; *6*, *9* — ярмовая изоляция; *7*, *8* — вторые и третьи концентры; *10* — уравнительная изоляция; *12* — деревянные клинья.

Выводы *9* (см. рис. 8.3) размещаются на крышке трансформатора. Каждый вывод состоит из токоведущей части и изолятора, отделяющего токоведущую часть от крышки. Один конец изолятора заходит внутрь бака, а другой — выступает над крышкой. Вокруг токоведущего стержня вывода создается большое магнитное поле, которое замыкается по крышке трансформатора. Потери от вихревых токов и перемагничивания нагревают крышку. Для уменьшения этих потерь в одном отверстии помещаются выводы начала и конца данной обмотки. Так как токи в выводах равны и противоположны по направлению, их результирующий магнитный поток практически равен нулю.

Система охлаждения (рис. 8.3) включает в себя принудительно вентилируемые охладительные секции (радиаторы) *4*, в которые трансформаторное масло подается с помощью электронасоса *7*. На трубопроводах, соединяющих бак с секциями, устанавливаются специальные краны, позволяющие заменять секции без слива всего масла. Для наполнения бака маслом или его слива в нижней части имеется фланцевый вентиль *5*.

На раме электровоза трансформатор закрепляется через резиновые амортизаторы, устанавливаемые в четырех стаканах *3*. Бак трансформатора заземляется на раму кузова через специальную бобышку.

8.4. Уравнения ЭДС трансформатора

Токи I_1 и I_2 в первичной и вторичной обмотках создают магнитные потоки рассеяния $\Phi_{1рас}$ и $\Phi_{2рас}$, каждый из которых сцеплен по воздуху лишь с витками собственной обмот-

ки. Эти переменные потоки индуцируют в «своих» обмотках ЭДС рассеяния

$$e_{1рас} = -L_{1рас}di_1/dt \quad и \quad e_{2рас} = -L_{2рас}di_2/dt,$$

где $L_{1рас}$ и $L_{2рас}$ — индуктивности рассеяния, которые можно считать постоянными.

Поскольку $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$,

$$e_{1рас} = -L_{1рас}\frac{d(I_{1m} \sin \omega t)}{dt} = -I_{1m}\omega L_{1рас} \cos \omega t =$$

$$= I_{1m}x_1 \sin (\omega t - \pi/2);$$

аналогично

$$e_{2рас} = I_{2m}x_2 \sin (\omega t - \pi/2),$$

где $x_1 = \omega L_{1рас}$ и $x_2 = \omega L_{2рас}$ — индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток соответственно. Таким образом, действующие значения этих ЭДС

$$\dot{E}_{1рас} = -j\dot{I}_1x_1; \quad (8.7)$$

$$\dot{E}_{2рас} = -j\dot{I}_2x_2. \quad (8.7,а)$$

(Здесь и далее точка над индексом свидетельствует о том, что это — комплексное действующее или амплитудное значение величины, являющейся синусоидальной функцией времени).

Итак, в каждой из обмоток трансформатора индуцируется по две ЭДС: от основного потока Ф и от потока рассеяния $Ф_{рас}$, поэтому для первичной обмотки трансформатора, согласно второму закону Кирхгофа, можно написать

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1рас} = \dot{I}_1r_1, \quad (8.8)$$

где r_1 — активное сопротивление первичной обмотки.

Подставим в (8.8) значение ЭДС рассеяния из (8.7), тогда

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1x_1 + \dot{I}_1r_1. \quad (8.9)$$

Наведенная потоком Ф ЭДС E_1 представляет собой ЭДС самоиндукции и поэтому находится в противофазе с подведенным напряжением U_1.

Таким образом, согласно (8.9), подведенное к первичной обмотке напряжение U_1 уравновешивается ЭДС E_1, а также падением напряжения в индуктивном и активном ее сопротивлениях.

Преобразуем уравнение (8.9):

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1\underline{Z}_1, \quad (8.10)$$

где $\underline{Z}_1 = (r_1 + jx_1)$ — полное сопротивление первичной обмотки. Черточка под индексом показывает, что это комплексная величина.

Для вторичной обмотки, замкнутой на нагрузку с полным сопротивлением $\underline{Z}_н$, согласно второму закону Кирхгофа,

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{2рас} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_н, \tag{8.11}$$

где r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки; сумма наведенных во вторичной обмотке ЭДС уравновешивается суммой падений напряжений. Как видно из рис. 8.1, падение напряжения на нагрузке представляет собой напряжение на выводах вторичной обмотки, т. е.

$$\dot{I}_2 \underline{Z}_н = \dot{U}_2. \tag{8.11,а}$$

С учетом этого уравнения (8.11) получит вид

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{2рас} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{U}_2. \tag{8.11,б}$$

Подставим в (8.11, б) выражение (8.7, а); тогда вторичное напряжение трансформатора

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_2, \tag{8.12}$$

где $\underline{Z}_2 = (r_2 + jx_2)$ — полное сопротивление вторичной обмотки.

Уравнения (8.10) и (8.12) позволяют заключить, что *трансформатор может работать только в цепях переменного тока, его включение в цепь постоянного тока не допустимо*. Действительно, если включить первичную обмотку в цепь постоянного тока, то потечет постоянный ток и образуется постоянный магнитный поток; значит, $E_2 = 0$ и энергия с первичной стороны не будет передаваться во вторичную. Кроме того, $E_1 = 0$, $E_{1рас} = 0$ и, согласно (8.9), $I_1 = U_1/r_1$, т. е. первичный ток достигнет недопустимо большого значения.

8.5. Уравнение МДС трансформатора

Для выяснения сущности физических процессов, происходящих в трансформаторе, идеализируем его, т. е. рассмотрим трансформатор, у которого нет потоков рассеяния (весь магнитный поток замыкается по магнитопроводу), в стали отсутствуют потери от вихревых токов и гистерезиса, а сопротивление первичной обмотки $r_1 = 0$.

У такого *идеализированного* трансформатора уравнение (8.10) примет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1, \text{ или } u_1 = -e_1, \qquad (8.13)$$

т. е. приложенное к первичной обмотке напряжение практически полностью уравновешивается индуцированной в этой обмотке ЭДС.

При холостом ходе такого трансформатора (на рис. 8.1 $Z_н = \infty$) по первичной обмотке течет ток i_0, а ее ЭДС

$$e_1 = -w_1 d\Phi_0/dt, \qquad (8.14)$$

где Φ_0 — магнитный поток при холостом ходе, вызванный МДС холостого хода $F_0 = i_0 w_1$.

Замкнем вторичную обмотку на нагрузку с сопротивлением $Z_н$; тогда по ней потечет ток i_2, создавая МДС $F_2 = i_2 w_2$; при этом ток первичной обмотки i_1 создаст МДС $F_1 = i_1 w_1$.

Обе МДС вызовут появление соответственно двух магнитных потоков Φ_1 и Φ_2; тогда уравнение (8.14) примет вид

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2)}{dt}. \qquad (8.15)$$

Однако и в этом случае (при нагрузке) приложенное напряжение u_1 неизменно и условие (8.13) остается прежним. Следовательно, значение e_1 при холостом ходе равно ему же при нагрузке. Но тогда можно приравнять правые части уравнений (8.14) и (8.15); следовательно,

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2. \qquad (8.16)$$

Уравнение (8.16) свидетельствует о *неизменности магнитного потока* при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки. Это является важнейшим свойством трансформатора.

На основании уравнения (8.16) можно написать закон равновесия МДС, вызывающих появление этих магнитных потоков:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2, \text{ или } i_0 w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2,$$

откуда

$$i_1 w_1 = i_0 w_1 + (-i_2 w_2). \qquad (8.17)$$

Из уравнения (8.17) следует, что МДС первичной обмотки трансформатора при нагрузке состоит из двух составляющих: 1) $i_0 w_1$, создающей магнитный поток; 2) $(-i_2 w_2)$ — равной по значению и противоположной по направлению МДС вторичной обмотки; она компенсирует МДС вторич-

ной обмотки. Этим и объясняется неизменность магнитного потока трансформатора.

Перейдя к действующим значениям токов, получим уравнение (8.17) в следующем виде:

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}_2 w_2). \qquad (8.18)$$

Следует подчеркнуть, что основные закономерности идеализированного трансформатора справедливы и для реальных трансформаторов, в частности уравнения МДС (8.18).

8.6. Приведенный трансформатор

Работу трансформаторов удобно изучать с помощью векторных диаграмм напряжений и токов. Но их значения, соответствующие первичной и вторичной обмоткам, могут очень сильно отличаться при больших коэффициентах трансформации. Например, практически невозможно отложить на одной диаграмме в одинаковом масштабе векторы первичного и вторичного напряжений, численно равные соответственно 25 000 В и 380 В (тяговый трансформатор). Даже совместные вычисления в этом случае затруднены.

Указанные затруднения устраняются приведением обеих обмоток трансформатора к одному числу витков. Для этого пересчитывают вторичную обмотку с числом витков w_2 на эквивалентную ей обмотку с числом витков w_1 с тем условием, чтобы *операция приведения не отразилась на режиме работы первичной цепи и энергетических соотношениях*. Все величины, относящиеся к приведенной вторичной обмотке, называются *приведенными* и обозначаются теми же символами, но со штрихом сверху: E_2', I_2', r_2' и т. д.

Таким образом, *приведенный* трансформатор — это такой эквивалентный трансформатор, у которого коэффициент трансформации $w_1/w_2' = 1$, поскольку $w_2' = w_1$.

Соотношения между приведенными и реальными параметрами могут быть получены исходя из следующих соображений.

Приведенная вторичная ЭДС может быть определена из выражения (8.5): $E_2 = E_1 w_2/w_1 = E_1/k$; следовательно, у приведенного трансформатора

$$E_2' = E_1 w_2'/w_1 = E_1 = kE_2. \qquad (8.19)$$

Приведенные вторичные ток и напряжение определяют из условия неизменности энергетических соотношений, а

именно: $E_2'I_2' = E_2I_2$; отсюда с учетом (8.19)

$$I_2' = I_2E_2/E_2' = I_2/k. \qquad (8.20)$$

Аналогично $U_2'I_2' = U_2I_2$; отсюда с учетом (8.20)

$$U_2' = U_2I_2/I_2' = kU_2. \qquad (8.20,а)$$

Приведенные сопротивления вторичной цепи находят из условия равенства активных и реактивных мощностей: $I_2'^2r_2' = I_2^2r_2$, отсюда с учетом (8.20)

$$r_2' = r_2(I_2/I_2')^2 = k^2r_2. \qquad (8.21)$$

Аналогично

$$I_2'^2x_2' = I_2^2x_2; \quad x_2' = k^2x_2. \qquad (8.21, а)$$

Полное сопротивление

$$Z_2' = \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2} = \sqrt{(k^2r_2)^2 + (k^2x_2)^2} = k^2Z_2. \qquad (8.21, б)$$

Аналогично приводится и полное сопротивление нагрузки:

$$Z_н' = k^2Z_н. \qquad (8.21, в)$$

Уравнение МДС трансформатора (8.18) после приведения будет иметь вид $\dot{I}_1w_1 = \dot{I}_0w_1 + (-\dot{I}_2'w_2')$, но поскольку $w_2' = w_1$, то оно превращается в уравнение токов $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$.

Это преобразование позволяет сделать важные выводы: 1) ток первичной обмотки трансформатора представляет собой сумму двух составляющих, одна из которых (I_0 — ток холостого хода) необходима для наведения в магнитопроводе основного магнитного потока, а вторая ($-I_2'$) равна по значению и обратна по направлению току вторичной обмотки; 2) любое изменение тока нагрузки (вторичной обмотки) сопровождается изменением первичного тока.

Поскольку магнитный поток является переменным, он вызывает появление в стали потерь от вихревых токов и гистерезиса, мощность которых эквивалентна активной составляющей тока I_0. Таким образом, этот ток имеет две составляющие: 1) реактивную $I_{0р}$, представляющую собой намагничивающий ток, совпадающий по фазе с потоком Ф; 2) активную $I_{0а}$, обусловленную магнитными потерями, очень малую по значению и опережающую реактивную составляющую на угол 90°. Следовательно,

$$I_0 = \sqrt{I_{0а}^2 + I_{0р}^2}. \qquad (8.22)$$

Изложенное позволяет записать три основных уравнения ЭДС и токов, с помощью которых можно описать все физические процессы, происходящие в приведенном трансформаторе:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1\underline{Z}_1; \quad (8.23,а)$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2'\underline{Z}_2'; \quad (8.23,б)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'). \quad (8.23,в)$$

Уравнение (8.23,а) — это неизмененное (8.10), а (8.23,б) — уравнение (8.12) после приведения.

8.7. Схема замещения приведенного трансформатора

Приведение вторичной обмотки к первичной позволяет не только облегчить и упростить расчеты, но и построить простую электрическую модель трансформатора, в которой магнитная связь между первичной и вторичной частями заменена легко исследуемой и рассчитываемой электрической связью.

Для такого построения выведем еще два вспомогательных уравнения; поскольку $\dot{E}_2' = E_1$, уравнение (8.23, б) можно записать так:

$$-\dot{E}_1 = -(\dot{U}_2' + \dot{I}_2'\underline{Z}_2'), \quad (8.24,а)$$

а для приведенного трансформатора уравнение (8.11,а) получает вид $\dot{U}_2' = \dot{I}_2'\underline{Z}_н'$. Тогда

$$-\dot{E}_1 = -\dot{I}_2'(\underline{Z}_2' + \underline{Z}_н'). \quad (8.24,б)$$

Уравнения (8.23,а) и (8.23,в) описывают электрическую цепь на рис. 8.5, *а*. Действительно, напряжение $\dot{U}_1$ уравновешивается ЭДС самоиндукции ($-\dot{E}_1$) и падением напряжения $\dot{I}_1 Z_1$; к узлу токов *а* притекает ток $\dot{I}_2'$, который направлен навстречу току $\dot{I}_1$. Величина ($-E_1$) численно может быть представлена падением напряжения $I_0 Z_m$ в некотором полном сопротивлении

$$Z_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2}. \quad (8.25)$$

Уравнения (8.24) описывают электрическую цепь на рис. 8.5, *б*. Действительно, если к электрической цепи, содержащей два последовательно соединенных резистора, приложить разность потенциалов, равную ($-E_1$), то в ука-

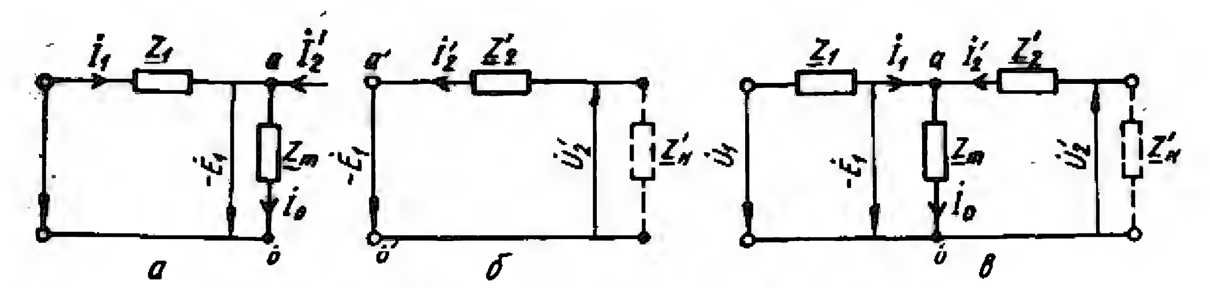


Рис. 8.5. Элементы схемы (*а, б*) и полная схема замещения (*в*) трансформатора

занном направлении потечет ток $\dot{I}_2'$. Видно, что на схемах рис. 8.5, *а* и *б* точки *a* и *a'*, *b* и *b'* являются соответственно точками равного потенциала, что позволяет их объединить и получить полную схему замещения (рис. 8.5, *в*).

Эта электрическая схема полностью, как и трансформатор с магнитной связью, описывается уравнениями (8.23); следовательно, она представляет собой модель трансформатора, собрав и исследовав которую можно изучить все явления, происходящие в трансформаторе. Ввиду особенности графического начертания схема получила название Т-образной.

8.8. Режим холостого хода трансформатора

Это режим работы трансформатора при отсутствии нагрузки, т. е. на рис. 8.1 $Z_н = \infty$ а на рис. 8.5, *в* $Z_н' = \infty$ и, следовательно, $\dot{I}_2' = 0$.

Схема режима холостого хода (как и других режимов), порядок проведения опыта даны в соответствующих руководствах по проведению лабораторных работ (или испытаний).

Основные уравнения трансформатора (8.23) получают вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0\underline{Z}_1; \quad (8.26,а)$$

$$\dot{U}_{20}' = \dot{E}_2', \quad \text{или} \quad \dot{U}_{20} = \dot{E}_2; \quad (8.26,б)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0. \quad (8.26,в)$$

Схема замещения режима холостого хода фактически есть элемент на рис. 8.5, *а* без притекающего тока $\dot{I}_2'$. Если к первичной обмотке подвести номинальное напряжение $U_{1ном}$, то вольтметр во вторичной обмотке измерит напряжение U_{20}, которое является *номинальным напряжением* вторичной обмотки и которое практически равно вторичной ЭДС. Тогда, согласно выражению (8.6), $k = U_{1ном}/U_{20}$.

Измерив амперметром ток I_0, а ваттметром потребляемую трансформатором мощность P_0, находят параметры схемы замещения:

$$Z_1 + Z_m = U_{1ном}/I_0; \quad r_1 + r_m = P_0/I_0^2$$

и

$$x_1 + x_m = \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (r_1 + r_m)^2}.$$

Ток I_0 по сравнению с номинальным очень мал (2—5 %); поэтому электрическими потерями $I_0^2 r_1$ пренебрегают, считая, что вся потребляемая мощность P_0 расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали $p_с$, т. е. $p_с = P_0$. При этом $P_0 = I_0^2 (r_1 + r_m) \approx I_0^2 r_m$, откуда

$$r_m = P_0/I_0^2. \quad (8.27,а)$$

Аналогично считают, что $x_1 + x_m \approx x_m$, так как $x_m \gg x_1$, поскольку x_m определяется основным потоком Ф (потоком взаимоиндукции), а x_1 — потоком рассеяния $Ф_{1рас}$, который во много раз меньше основного. Следовательно,

$$Z_m = U_{1ном}/I_0; \quad (8.27,б)$$

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}. \quad (8.27,в)$$

Поэтому участок схемы замещения между точками a и b на рис. 8.5 и определяемый выражением (8.25) называют *цепью намагничивания.*

Итак, опыт холостого хода позволяет опытным путем определить коэффициент трансформации, магнитные потери в стали и параметры части схемы замещения. Уравнения (8.26) позволяют построить векторную диаграмму при холостом ходе.

8.9. Режим короткого замыкания трансформатора

Это режим при замкнутых накоротко зажимах вторичной обмотки трансформатора, т. е. на рис. 8.1 $Z_н = 0$, а на рис. 8.5, *в* $Z'_н = 0$ и $U'_2 = 0$. В эксплуатации такой режим является аварийным и опасен для трансформатора. Но при проведении опыта к первичной обмотке трансформатора подводят ничтожно малое напряжение, которое постепенно повышают до тех пор, пока при некотором его значении $U_{1к}$ по обмоткам потекут номинальные токи. Напряжение обычно составляет 5—10 % номинального, поэтому магнитный поток, значение которого зависит от напряжения [см. уравнения (8.4) и (8.23, а)], также мал. Но магнитные по-

тери в стали, как известно, пропорциональны квадрату индукции, т. е. квадрату магнитного потока.

Например, пусть при опыте короткого замыкания $U_{1к} = 0{,}07\ U_{1ном}$; тогда $\Phi_к \approx 0{,}07\ \Phi_{ном}$ и магнитные потери составят $(\Phi_к/\Phi_{ном})^2 \cdot 100 = 0{,}07^2 \cdot 100 = 0{,}49$ % магнитных потерь при номинальном режиме. В таком случае потерями в стали и током холостого хода можно пренебречь.

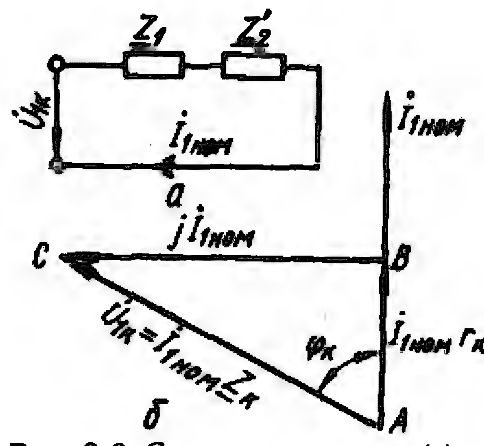


Рис. 8.6. Схема замещения (*а*) и векторная диаграмма (*б*) трансформатора при опыте короткого замыкания

При этом из схемы замещения исключается цепь намагничивания, а сама схема получит вид, представленный на рис. 8.6, *а*; согласно условию проведения режима короткого замыкания $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' = \dot{I}_{1ном}$.

Полное сопротивление схемы замещения при коротком замыкании

$$Z_к = Z_1 + Z_2' = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} + \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2} =$$

$$= \sqrt{r_к^2 + x_к^2} = U_{1к}/I_{1ном}. \qquad (8.28, а)$$

При проведении опыта короткого замыкания ваттметром измеряют потребляемую из сети мощность $P_к$; тогда

$$r_к = r_1 + r_2' = P_к/I_{1ном}^2; \qquad (8.28, б)$$

$$x_к = x_1 + x_2' = \sqrt{Z_к^2 - r_к^2}. \qquad (8.28, в)$$

Величины $Z_к$, $r_к$ и $x_к$ называются *параметрами короткого замыкания.*

Поскольку в режиме короткого замыкания потери в стали $p_с = 0$, вся мощность $P_к$ расходуется на покрытие электрических потерь в обеих обмотках $I_{1ном}^2 r_к$ или, как часто говорят, потерь в меди, т. е. $p_{м1} + p_{м2} = P_к$.

Разделить $Z_к$ по (8.28, а) на составляющие весьма трудно. Обычно их принимают одинаковыми, т. е. $Z_1 = Z_2' = Z_к/2$, что очень близко к действительности.

Построим векторную диаграмму режима короткого замыкания (рис. 8.6, *б*), имея в виду, что, согласно (8.23, а) схеме замещения, в этом режиме $\dot{U}_{1к} = \dot{I}_{1ном}\underline{Z}_к$.

Совместим вектор тока $\dot{I}_{1ном}$ с осью ординат; тогда вектор активного падения напряжения $\dot{I}_{1ном} r_к$ будет находиться с ним

в фазе, а индуктивного — $j\dot{I}_{1ном}x_к$ повернут против хода часовой стрелки на угол 90° (символ j). Полное падение напряжения $\dot{I}_{1ном}\underline{Z}_к$ представляет собой гипотенузу прямоугольного треугольника, который называют *треугольником короткого замыкания*. Отметим, что *все его стороны пропорциональны току*.

Из треугольника короткого замыкания определяют важнейший параметр трансформатора — *напряжение короткого замыкания* $u_к$, которым называют выраженное в процентах отношение первичного напряжения $U_{1к}$ к номинальному $U_{1ном}$, когда в режиме короткого замыкания по обмоткам трансформатора текут номинальные токи; следовательно,

$$u_к = \frac{U_{1к}}{U_{1ном}} \cdot 100. \qquad (8.29)$$

Обычно $u_к = 5 \div 10$ %.

Катеты треугольника на рис. 8.6, *б* AB и BC называют соответственно *активной*

$$u_{к.а} = u_к \cos \varphi_к \qquad (8.29, а)$$

и *реактивной*

$$u_{к.р} = u_к \sin \varphi_к \qquad (8.29, б)$$

составляющими напряжения короткого замыкания и также выражают в процентах.

Отношение реактивной и активной составляющих

$$\operatorname{tg} \varphi_к = BC/AB = u_{к.р}/u_{к.а} = x_к/r_к = 1 \div 10,$$

в зависимости от мощности трансформатора, причем большее значение относится к трансформаторам большей мощности.

Итак, опыт короткого замыкания позволяет определить потери в меди, напряжение короткого замыкания, параметры короткого замыкания схемы замещения (значит, Z_1 и Z_2') и построить треугольник короткого замыкания.

Обычно у трансформаторов $P_0/P_к \approx 1/3$ и при номинальных токах потери в меди, т. е. $P_к$, составляют 0,5—2 % номинальной мощности трансформатора, причем большее значение относится к трансформаторам меньшей мощности.

8.10. Режим нагрузки трансформатора

Этому режиму соответствует схема замещения на рис. 8.5, *в*, а физические процессы в нем описываются уравнениями (8.23), с помощью которых можно построить точную векторную диаграмму и получить наглядное представление

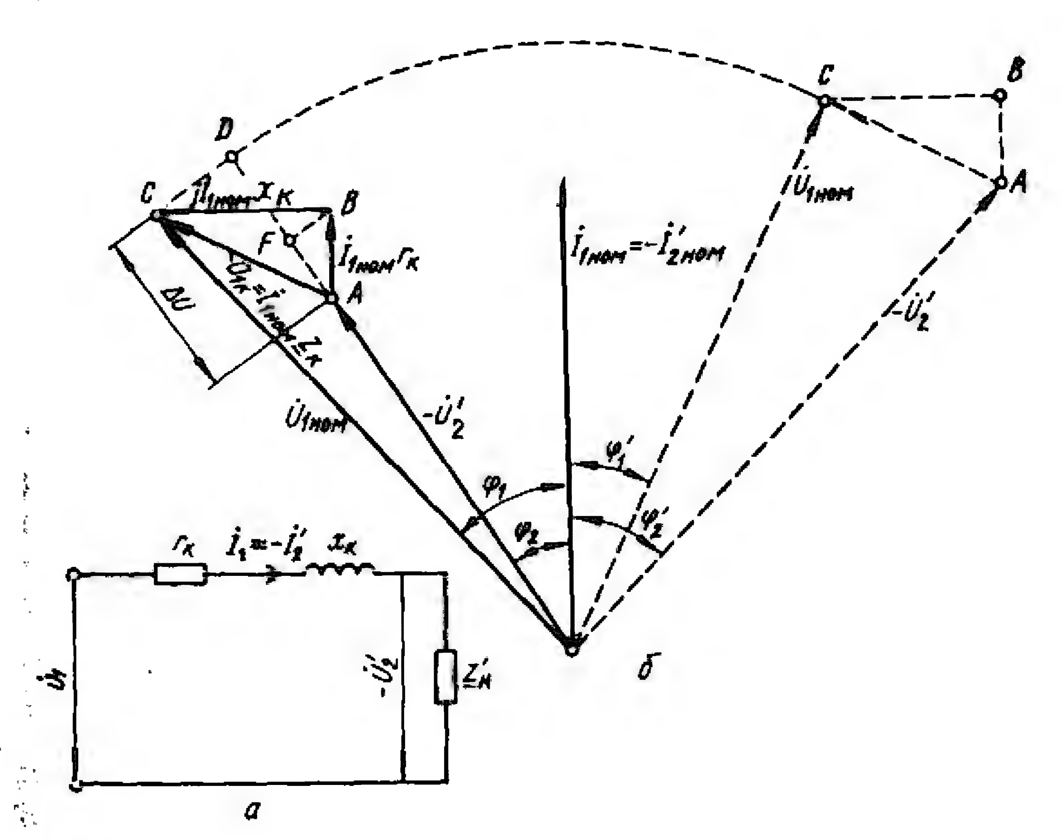


Рис. 8.7. Упрощенная схема замещения (*а*) и векторная диаграмма (*б*) трансформатора, работающего в режиме нагрузки

о соотношениях между всеми параметрами трансформатора. Однако для использования в практических целях эта векторная диаграмма оказывается достаточно сложной, поэтому ее требуется упростить.

Поскольку ток холостого хода в силовых трансформаторах чрезвычайно мал, во многих случаях с достаточной для практики точностью им можно пренебречь, т. е. принять $\dot I_0 = 0$, а значит, $Z_m = \infty$ на рис. 8.5, *в*. В таком случае уравнение токов (8.23, в) получает вид

$$\dot I_1 = -\dot I_2', \tag{8.30}$$

а схема замещения — как это изображено на рис. 8.7, *а*. Ее параметры определены уравнениями (8.28); знак «минус» у вторичного напряжения объясняется тем, что на схеме рис. 8.5, *в* показано направление вторичного тока $(+\dot I_2)$, а на схеме рис. 8.7, *а* — направление тока $(-\dot I_2')$.

Для схемы на рис. 8.7, *а* вместо двух уравнений (8.23, а) и (8.23, б), согласно закону Ома, можно написать одно:

$$\dot U_1 = \dot I_1 \underline{Z}_к + (-\dot I_2' \underline{Z}_н') = -\dot U_2' + \dot I_1 \underline{Z}_к, \tag{8.31}$$

где $\underline{Z}_к$ определяется по (8.28, а).

Из уравнения (8.31) следует, что при пренебрежении током I_0 трансформатор может быть замещен параметром короткого замыкания $Z_к$.

Нагрузка трансформатора определяется как своей величиной, так и характером, т. е. она может быть чисто активной (ток и напряжение совпадают по фазе и угол между ними $\varphi_2 = 0$), активно-индуктивной (ток отстает от напряжения и угол $\varphi_2 > 0$) и активно-емкостной (ток опережает напряжение и угол $\varphi_2 < 0$).

Построим векторную диаграмму для схемы на рис. 8.7, *а*, считая, что к трансформатору подведено номинальное напряжение, он нагружен номинальным током $I_{1ном}$, а характер нагрузки — активно-индуктивный — определяется коэффициентом мощности $\cos\varphi_2$, т. е. известен угол φ_2.

Отметим, что вторичное напряжение при этих условиях, с учетом (8.30), соответствует номинальному току:

$$-\dot{U}_2' = \dot{I}_{1ном}\underline{Z}_н' = -\dot{I}_{2ном}'\underline{Z}_н'.$$

Для построения и выяснения практических возможностей векторной диаграммы (рис. 8.7, *б*) полагаем, что значение $Z_н$ известно.

Совместим с осью ординат вектор тока $\dot{I}_{1ном} = -\dot{I}_{2ном}'$; на угол φ_2 его опережает вектор напряжения $(-\dot{U}_2')$. Для построения вектора напряжения $\dot{U}_{1ном}$ обратимся к уравнению (8.31): оба напряжения отличаются друг от друга на величину $\dot{I}_1\underline{Z}_к$, которая, как следует из (8.28, а), при номинальном токе представляет собой напряжение в режиме короткого замыкания, т. е. гипотенузу треугольника короткого замыкания. Следовательно, для построения вектора $\dot{U}_{1ном}$ необходимо к концу вектора $(-\dot{U}_2')$ пристроить треугольник короткого замыкания (рис. 8.6, *б*) так, чтобы катет AB (активная составляющая) совпадал по направлению с вектором тока, а катет BC (реактивная составляющая) был ему перпендикулярен. Проведя затем прямую OC, получим вектор напряжения $\dot{U}_{1ном}$, который опережает ток на угол φ_1.

При токе, отличном от номинального,

$$I_1 = k_н I_{1ном}, \qquad (8.32)$$

где $k_н$ — коэффициент нагрузки, в $k_н$ раз изменятся все стороны треугольника короткого замыкания (см. рис. 8.6, *б*). При неизменном значении первичного напряжения это приведет к изменению вторичного напряжения (см. рис. 8.7, *б*), которое, следовательно, зависит от нагрузки. Это первый

важный практический вывод, полученный с помощью векторной диаграммы.

При изменении характера нагрузки (угла φ_2, а значит, и φ_1) также происходит изменение вторичного напряжения. Действительно, модуль вектора $\mathbf{U}_{1ном}$ неизменен, но в зависимости от значения угла φ_1 он может изменять свое положение. Треугольник ABC при этом неизменен и сохраняет свое положение в плоскости чертежа. Проведя окружность радиусом OC и перемещая вектор $\mathbf{U}_{1ном}$ по ходу часовой стрелки (штриховая часть диаграммы на рис. 8.7, *б*), убедимся, что при активной нагрузке ($\varphi_2 = 0$) вторичное напряжение возросло, а при активно-емкостной ($\varphi_2 = \varphi_2' < 0$) — стало еще больше.

Таким образом, можно сделать второй вывод: вторичное напряжение зависит от характера нагрузки при неизменной ее величине.

8.11. Изменение напряжения и внешняя характеристика трансформатора

Номинальным изменением напряжения трансформатора при заданном $\cos\varphi_2$ называется выраженная в процентах номинального вторичного напряжения арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением на выводах вторичной обмотки при холостом ходе и напряжением на тех же выводах при номинальном вторичном токе, номинальной частоте и номинальном первичном напряжении:

$$\Delta u_{ном} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{U_{20}' - U_2'}{U_{20}'} \cdot 100. \quad (8.33)$$

Поскольку при холостом ходе отсутствуют падения напряжения в обмотках трансформатора, то согласно уравнению (8.31) $U_2' = U_1$, а при их номинальных значениях $U_{20}' = U_{1ном}$; тогда уравнение (8.33) примет вид

$$\Delta u_{ном} = \frac{U_{1ном} - U_2'}{U_{1ном}} \cdot 100 = \frac{\Delta U_{ном}}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (8.33, а)$$

Абсолютное значение изменения напряжения $\Delta U_{ном} = U_{1ном} - U_2'$ может быть определено следующим образом.

Угол $(\varphi_1 - \varphi_2)$ между векторами первичного и вторичного напряжений на рис. 8.7, *б* очень мал, поэтому приближенно за модуль вектора $\mathbf{U}_{1ном}$ можно принять его проекцию

на направление вектора ($-\dot{U}_2'$), т. е. отрезок OD; тогда $\Delta U_{ном} = OD - OA = DA$. Непосредственно измерить $\Delta U_{ном}$ с достаточной точностью на векторной диаграмме очень трудно ввиду малости этой величины.

Спроектируем на линию OD векторы $\dot{I}_{1ном} r_к$ и $j\dot{I}_{1ном} x_к$, т. е. соответственно активную и индуктивную составляющие напряжения $\dot{U}_{1к}$. Их проекциями будут отрезки AF и FD. Следовательно,

$$\Delta U_{ном} = DA = AF + FD =$$
$$= I_{ном} r_к \cos \varphi_2 + I_{1ном} x_к \sin \varphi_2.$$

Подставив это значение в формулу (8.33, а), получим

$$\Delta u_{ном} = \frac{I_{1ном} r_к \cos \varphi_2 + I_{1ном} x_к \sin \varphi_2}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (8.34,а)$$

Напомним, что согласно формулам (8.29),

$$\frac{I_{1ном} r_к}{U_{1ном}} \cdot 100 = u_{к.а} \quad и \quad \frac{I_{1ном} x_к}{U_{1ном}} \cdot 100 = u_{к.р}$$

— соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания; с учетом этого

$$\Delta u_{ном} = u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_2. \quad (8.34, б)$$

Принимая во внимание условие (8.30), на основании выражения (8.34, а) можно сделать вывод о том, что *изменение напряжения пропорционально току нагрузки;* его можно определить для любого тока, отличающегося от номинального в $k_н = I_1/I_{1ном}$ раз. Действительно, стороны треугольника короткого замыкания (величины $u_{к.а}$ и $u_{к.р}$) пропорциональны току, т. е. коэффициенту нагрузки; поэтому

$$\Delta u = k_н (u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_2). \quad (8.35, а)$$

Имея в виду выражения (8.29, а) и (8.29, б), получим еще одну формулу для определения изменения напряжения при любой нагрузке:

$$\Delta u = k_н (u_к \cos \varphi_к \cos \varphi_2 + u_к \sin \varphi_к \sin \varphi_2) =$$
$$= k_н u_к \cos (\varphi_к - \varphi_2). \quad (8.35, б)$$

Выражение (8.35, б) позволяет сделать два важных вывода: 1) изменение напряжения больше у того трансформатора, у которого больше напряжение короткого замыкания; 2) при заданной величине нагрузки Δu достигает наибольшего значения при $\varphi_2 = \varphi_к$.

Следует оговориться, что сделанные при выводе формул (8.34) допущения вносят некоторую неточность при определении Δu для активно-емкостной нагрузки, когда $\varphi_2 < 0$.

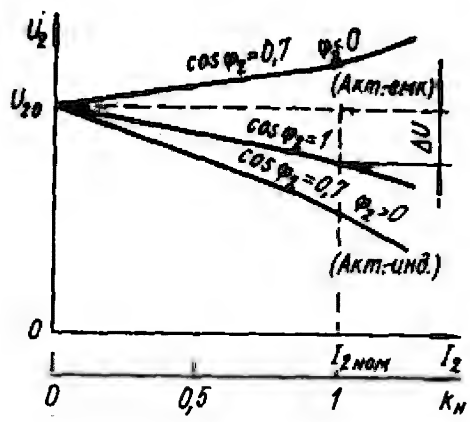


Рис. 8.8. Внешние характеристики трансформатора

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость $U_2 = f(I_2)$. Ее можно также представить как зависимости $U_2' = f(I_2')$ или $U_2 = f(k_н)$ и построить с помощью формул (8.35) для любого характера нагрузки.

На рис. 8.8 показаны внешние характеристики при различных характерах нагрузки; в пределах $0 < k_н < 1$ они практически прямолинейны.

Таким образом, тяговые двигатели электровоза переменного тока, представляющие для тягового трансформатора активно-индуктивную нагрузку, во время движения питаются изменяющимся напряжением. Аналогично изменяется и напряжение в контактной сети, получающей питание от трансформаторов тяговых подстанций.

Контрольные вопросы и задачи

1. С какой целью и где применяются трансформаторы?
2. На чем основан принцип действия трансформатора; что такое коэффициент трансформации?
3. Из каких элементов состоит активная часть трансформатора? Каково их назначение?
4. Опишите устройство тягового трансформатора; каково назначение трансформаторного масла и для чего применяется расширитель?
5. Как выводятся уравнения ЭДС трансформатора?
6. Почему трансформатор нельзя включать в сеть постоянного тока?
7. Напишите уравнение МДС трансформатора и объясните роль каждой составляющей. Изменяется ли магнитный поток при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки?
8. Что такое приведенный трансформатор? Для чего и при каких условиях делается приведение?
9. Почему с увеличением вторичного тока растет первичный ток?
10. Что называется схемой замещения трансформатора? Как она строится?
11. Что определяют при проведении режимов холостого хода и короткого замыкания трансформатора?
12. Что называют напряжением короткого замыкания трансформатора, в каких единицах оно измеряется?
13. Изобразите упрощенную схему замещения трансформатора в режиме нагрузки и соответствующую ей векторную диаграмму; покажите, как будет изменяться вторичное напряжение при изменении величины и характера нагрузки.

14. Что называется номинальным изменением напряжения трансформатора; покажите его на внешних характеристиках при различных характерах нагрузки.

15. ЭДС во вторичной обмотке трансформатора 100 В, числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно равны 300 и 60. Чему равно приведенное значение ЭДС?

16. В режиме короткого замыкания вольтметр показывает 50 В, амперметр — 10 А, ваттметр — 300 Вт. Определите параметры короткого замыкания и номинальное изменение напряжения при $\cos \varphi_2 = 0{,}8$ (если $\varphi_2 > 0$ и $\varphi_2 < 0$) трансформатора, первичное напряжение которого равно 1000 В.

Глава 9. ТРЕХФАЗНЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

9.1. Назначение и принцип выполнения трехфазного трансформатора

Трехфазный трансформатор служит для преобразования электрической энергии трехфазного тока с одним соотношением линейных напряжений и токов в электрическую энергию трехфазного тока с другим соотношением этих же величин.

Как правило, трехфазными выполняются силовые трансформаторы, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии на трансформаторных подстанциях промышленных предприятий.

В системах электропередачи, где требуется преобразовывать большие мощности (более 80 000 кВ · А), вместо трехфазных трансформаторов используются группы, состоящие из трех однофазных трансформаторов. Объясняется это громоздкостью трехфазных трансформаторов большой мощности и сложностью их транспортировки от заводов-изготовителей до места монтажа.

Обмотки трех однофазных силовых трансформаторов, составляющих трехфазную группу, соединяют между собой в звезду или в треугольник.

Магнитопровод трехфазного трансформатора состоит из трех вертикальных стержней, замкнутых между собой сверху и снизу ярмами.

Принцип образования трехфазного трехстержневого трансформатора заключается в следующем. Выполним трехфазную группу из трех однофазных трансформаторов (рис. 9.1, *а*), по обмоткам которых *A*, *B* и *C* текут синусоидальные токи, сдвинутые во времени относительно друг друга на угол 2π/3 рад. Будем считать, что соответствующие магнитные потоки также синусоидальны, т. е.

$$\Phi_A = \Phi_m \sin \omega t, \quad \Phi_B = \Phi_m \sin(\omega t - 2\pi/3),$$
$$\Phi_C = \Phi_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

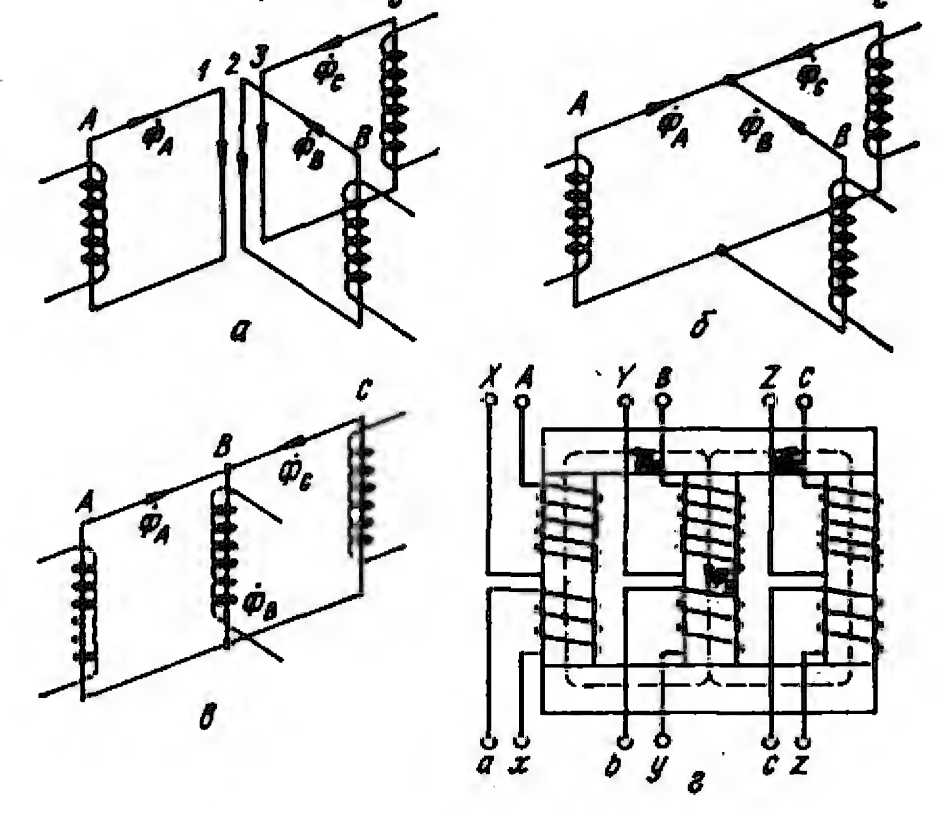


Рис. 9.1. Образование трехстержневого трехфазного трансформатора (*а*—*в*) и его схема (*г*)

Объединим три стержня *1*, *2* и *3* (см. рис. 9.1, *а*) в один общий, тогда суммарный магнитный поток в нем

$$\Sigma\Phi = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = \Phi_m [\sin \omega t + \sin(\omega t - 2\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3)] = \Phi_m [\sin \omega t + \sin \omega t \cos 2\pi/3 - \cos \omega t \sin 2\pi/3 + \sin \omega t \cos 4\pi/3 - \cos \omega t \sin 4\pi/3] = \Phi_m [\sin \omega t (1 - 0{,}5 - 0{,}5) - \cos \omega t (\sqrt{3}/2 - \sqrt{3}/2)] = 0. \quad (9.1)$$

Следовательно, этот общий стержень можно удалить, получив симметричный трехфазный трансформатор (рис. 9.1, *б*).

В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский отметил, что падение магнитного потенциала в ярмах трансформатора фазы В невелико и предложил их удалить, получив более компактный трансформатор (рис. 9.1, *в*). Эта конструкция получила всеобщее распространение. Такой магнитопровод не вполне симметричен; чтобы уменьшить несимметрию, сечения ярма выполняют несколько больше сечения стержней. Кроме того, такая магнитная несимметрия сказывается только на токе холостого хода: в обмотке фазы *В* (средний стержень) он будет меньше, чем в других фазах. Но, как показано в п. 8.10, ток холостого хода оказывает весьма

малое влияние на рабочие токи обмоток. На каждый стержень насаживают обмотку ВН и НН (рис. 9.1, *г*), поэтому при симметричном питающем напряжении и равномерной нагрузке все фазы находятся в одинаковых условиях. Следовательно, выведенные ранее формулы и схемы замещения для однофазного трансформатора справедливы и для трехфазного трансформатора. Исключение составляет режим холостого хода, на который оказывает влияние схема соединения обмотки.

Другой особенностью трехфазных трансформаторов является необходимость соблюдения начал и концов при соединении как первичных, так и вторичных обмоток (фаз) трансформатора. Обычно первичная и вторичная обмотки (фазы) имеют одинаковое направление намотки на стержне трансформатора; поэтому направление их магнитных потоков одинаковое, так как соединение обмоток согласное. Если же начала и концы фаз перепутать, то соединение может получиться встречное, что приведет к нарушению нормальной работы трансформатора.

На рис. 9.1, *г* показано обозначение начал и концов первичных и вторичных обмоток: A, B, C и X, Y, Z соответственно начала и концы фаз обмотки ВН; a, b, c и x, y, z соответственно начала и концы фаз обмоток НН.

Обмотки соединяют «звездой» (Y; У) или «треугольником» (Δ; Д); соединение показывают условными обозначениями через дробь, в которой числитель — обмотка ВН. Например, если обмотки трансформатора соединены по схеме «звезда — звезда», то условное обозначение будет Y/Y; схема «звезда с нулевым проводом — треугольник» обозначается Y₀/Δ.

9.2. Группы соединений трехфазных трансформаторов

До сих пор при изучении работы трансформаторов мы полагали, что векторы ЭДС $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ совпадают по фазе. Это справедливо лишь при одинаковой намотке и одноименной маркировке выводов первичной и вторичной обмоток (рис. 9.2, *а*). Если же в трансформаторе изменить направление намотки обмотки НН или же при сохранении намотки переставить обозначения ее выводов (рис. 9.2, *а* — в скобках), то вектор $\dot{E}_2$ окажется сдвинутым по фазе относительно $\dot{E}_1$ на угол $\alpha = 180°$ (рис. 9.2, *б*). Аналогично обстоит дело и со сдвигом векторов первичного и вторичного напряжений, поскольку для внешней нагрузки (потребителя) ЭДС и напряжение имеют одинаковую фазу.

В трехфазных трансформаторах угол α зависит также и от схемы соединения первичной и вторичной обмоток, причем его значение может изменяться от 0 до 360°, а кратность сдвига составляет 30°. В зависимости от значения угла α трансформаторы разделяют на группы соединений, которые обозначают цифрами часового циферблата: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

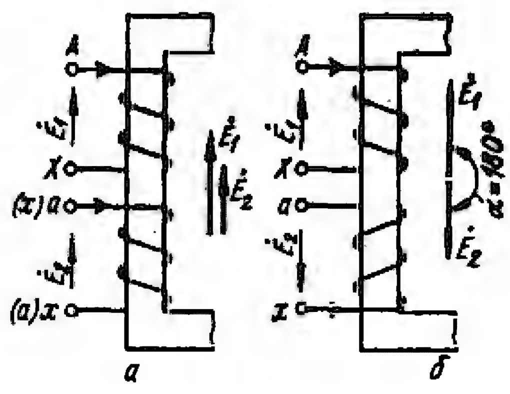


Рис. 9.2. Группы соединений обмоток однофазного трансформатора

Как видно из рис. 9.2, для однофазных трансформаторов возможны две группы соединений: *нулевая* (рис. 9.2, *а*) и *шестая* (рис. 9.2, *б*). В СССР выпускают однофазные трансформаторы только нулевой группы (угол $\alpha = 0$), которая обозначается 1/1—0.

Группа соединения определяется так: вектор первичного линейного напряжения совмещают с цифрой 12 часового циферблата, тогда вектор вторичного линейного напряжения укажет номер группы соединения; если же векторы совпадают — группа нулевая. Можно определить группу, разделив угол смещения α этих векторов на 30.

Для примера на рис. 9.3 показаны схемы соединения обмоток Y/Y и соответствующие векторные диаграммы для нулевой (рис. 9.3, *а*) и шестой (9.3, *б*) групп. На рис. 9.4 изображены схемы соединения обмоток Y/Δ и соответствую-

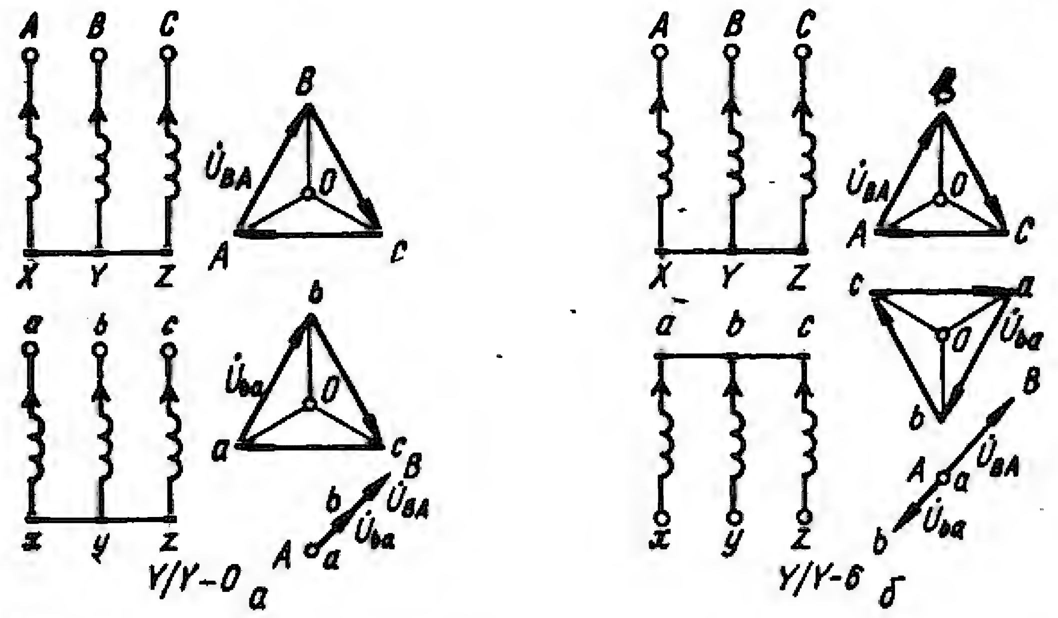


Рис. 9.3. Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Y

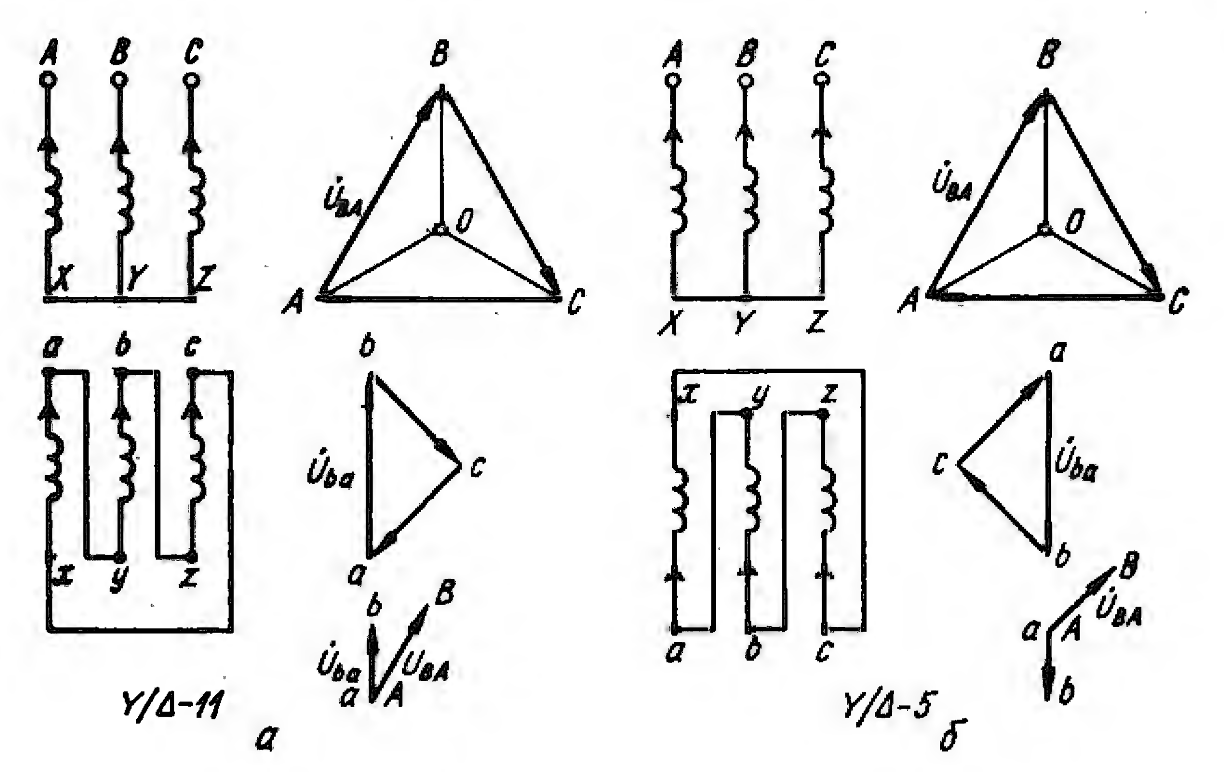


Рис. 9.4. Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Δ

щие векторные диаграммы для *одиннадцатой* (рис. 9.4, *а*) и *пятой* (рис. 9.4, *б*) групп.

Рассмотренные четыре группы соединения (0, 6, 11 и 5) называют *основными*. Из них путем круговой перемаркировки можно получить и другие (*производные*) группы соединений: при схемах Y/Y и Δ/Δ — четные, а при схемах Y/Δ и Δ/Y — нечетные. Например, если в трансформаторе с группой соединения Y/Y — 0 выводы обмотки НН перемаркировать и вместо последовательности *abc* принять последовательность *cba*, то вектор $\dot{U}_{ab}$ повернется на угол $\alpha = 120°$, образуется группа Y/Y — 4; переставив обозначения выводов у группы Y/Y — 4, получим группу Y/Y — 10 и т. д.

В СССР выпускают трехфазные силовые трансформаторы только двух групп: нулевой и одиннадцатой, что облегчает их включение на параллельную работу.

9.3. Параллельная работа трансформаторов

Дробление общей трансформаторной мощности на ряд параллельно работающих трансформаторов (их первичные и вторичные обмотки соответственно включены параллельно) позволяет:

лучше решить проблему резервирования энергоснабжения потребителей;

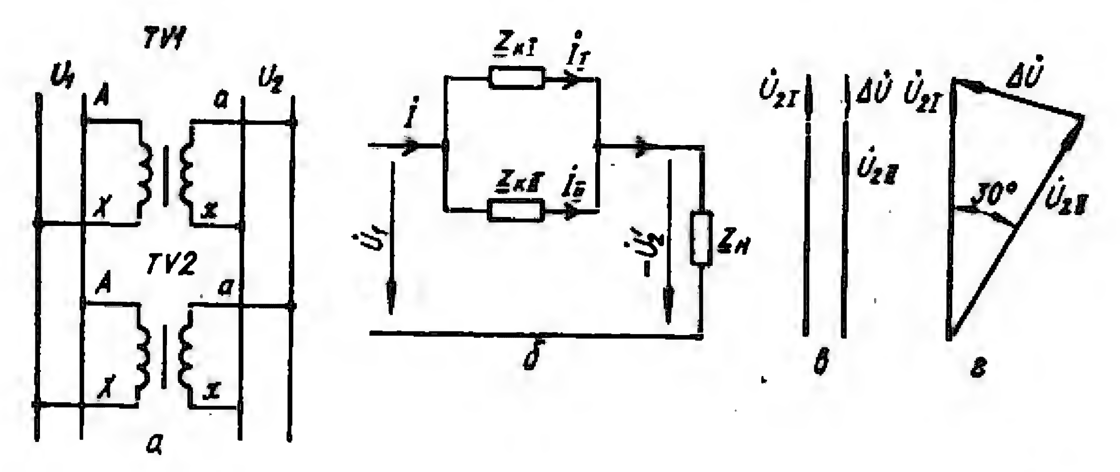


Рис. 9.5. Схемы включения (*а*) и замещения (*б*) трансформаторов, появление напряжения ΔU при их параллельной работе с разными коэффициентами трансформации (*в*) или принадлежности к разным группам соединений обмоток (*г*)

отключить часть трансформаторов при уменьшении нагрузки;

упростить организацию профилактического ремонта. При этом должны быть соблюдены следующие три условия включения на параллельную работу:

1) номинальные первичные и соответственно вторичные напряжения должны быть одинаковы, т. е. должны быть одинаковы коэффициенты трансформации ($k_{\rm I} = k_{\rm II} = \ldots = k_n$);

2) параллельно работающие трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединений;

3) параллельно работающие трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания ($u_{k\rm I} = u_{k\rm II} = \ldots = u_{kn}$).

Рассмотрим поочередно последствия несоблюдения этих условий.

Неравенство коэффициентов трансформации, т. е. $k_{\rm I} \neq k_{\rm II}$ (подразумевается, что $U_{\rm 1I} = U_{\rm 1II}$). При этом между параллельно включенными трансформаторами (рис. 9.5, *а*), полные сопротивления которых $Z_{k\rm I}$ и $Z_{k\rm II}$ (см. п. 8.9), возникает уравнительный ток, обусловленный разностью вторичных напряжений (рис. 9.5, *в*):

$$\dot I_{\rm ур} = \Delta\dot U/(\underline{Z}_{k\rm I} + \underline{Z}_{k\rm II}).$$

Этот уравнительный ток перегружает трансформатор с более высоким вторичным напряжением холостого хода (с меньшим коэффициентом трансформации). Трансформатор с бо́льшим коэффициентом трансформации оказывается недогруженным. Поскольку перегрузка трансформаторов недопустима, приходится снижать общую нагрузку. На практике допускается параллельная работа трансформато-

ров, если различие в их коэффициентах трансформации не превышает 0,5 %, а для трансформаторов с $k > 3$ — не более 1 %. В этом случае значение ΔU будет небольшим и уравнительный ток незначительным.

Неодинаковые группы соединения. В этом случае между одноименными зажимами вторичных обмоток возникает разность напряжений (рис. 9.5, *г*), которая при наименьшем возможном значении угла $\alpha = 30°$ достигает значения $\Delta U = 2U_2 \sin 15° = 0{,}52U_2$. У совершенно одинаковых трансформаторов уравнительный ток

$$I_{\text{ур}} = \Delta U / 2Z_k = 0{,}26U_2 / Z_k.$$

В данном случае величина $0{,}26U_2$ представляет собой напряжение, приложенное к короткозамкнутому трансформатору, а $I_{\text{ур}}$ является током короткого замыкания. Сравнивая эти величины с аналогичными в п. 8.9, видим, что они примерно в 3—5 раз превышают напряжение короткого замыкания и номинальный ток трансформатора. Как видно, такое включение совершенно недопустимо.

Неодинаковые напряжения короткого замыкания, т. е. $u_{kI} \neq u_{kII}$.

Распределение нагрузок между двумя параллельно включенными трансформаторами (см. рис. 9.5, *б*) можно найти из условия

$$\dot{I}_{I}\underline{Z}_{kI} = \dot{I}_{II}\underline{Z}_{kII}.$$

Заменив комплексные величины их модулями, получим

$$\frac{I_{I}}{I_{II}} = \frac{1}{Z_{kI}} : \frac{1}{Z_{kII}},$$

или, согласно п. 8.9,

$$\frac{I_{I}}{I_{II}} = \frac{I_{I\text{ном}}}{I_{I\text{ном}}Z_{kI}} : \frac{I_{II\text{ном}}}{I_{II\text{ном}}Z_{kII}} = \frac{I_{I\text{ном}}}{U_{1kI}} : \frac{I_{II\text{ном}}}{U_{1kII}}.$$

Согласно выражению (8.29) $U_{1k} = \dfrac{u_k U_{1\text{ном}}}{100}$; тогда

$$\frac{I_{I}}{I_{II}} = \frac{I_{I\text{ном}}}{u_{kI}U_{1\text{ном}}} : \frac{I_{II\text{ном}}}{u_{kII}U_{1\text{ном}}} = \frac{S_{I\text{ном}}}{u_{kI}} : \frac{S_{II\text{ном}}}{u_{kII}}.$$

Таким образом, для того чтобы токи нагрузки в параллельно работающих трансформаторах распределились прямо пропорционально их номинальным мощностям $S_{I\text{ном}}$ и $S_{II\text{ном}}$, трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания.

Действительно, если $u_{kI} \neq u_{kII}$, то при параллельной работе больше нагружается трансформатор с меньшим $u_к$, и чтобы не допустить его перегрузки, приходится снижать общую нагрузку. Следовательно, неравенство напряжений короткого замыкания не допускает полного использования параллельно включенных трансформаторов по мощности. Удовлетворительное распределение нагрузки имеет место, когда значения $u_к$ отклоняются от их среднеарифметического значения не более чем на ± 10 %. Но поскольку разница в значениях $u_к$ тем больше, чем больше трансформаторы отличаются по мощности, рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей параллельно работающих трансформаторов было не более, чем $S_{Iном}/S_{IIном} = {}^3/_1$.

Это требование объясняется тем, что у трансформаторов разных мощностей активные и реактивные составляющие напряжения короткого замыкания [см. выражение (8.29)] различны: у трансформаторов большей мощности $u_{к.р}$ больше, а $u_{к.а}$ меньше, чем у трансформаторов малой мощности. Если $u_{кI} = u_{кII}$, но $u_{к.рI} \neq u_{к.рII}$ и $u_{к.аI} \neq u_{к.аII}$, то токи параллельно работающих трансформаторов будут сдвинуты по фазе на некоторый угол (см. рис. 8.6, *б*). При этом суммарный ток, отдаваемый нагрузке, будет равен векторной сумме обоих трансформаторов, т. е. меньше их алгебраической суммы. Значит, и в этом случае номинальная мощность трансформаторов не будет полностью использоваться.

9.4. Автотрансформатор

Это такой трансформатор, у которого между первичной и вторичной обмотками есть не только магнитная, но и электрическая (гальваническая) связь. Автотрансформаторы могут быть *повышающими* и *понижающими*, *одно-* или *трехфазными*.

Рассмотрим принцип работы на примере однофазного понижающего автотрансформатора, схема которого представлена на рис. 9.6.

В режиме холостого хода ($Z_н = \infty$, $I_2 = 0$) проходящий по обмотке $A - X$ ток приводит к появлению магнитного потока, который индуцирует в каждом витке ЭДС $E = 4{,}44 f \Phi_m$; следовательно, на зажимах ax появится ЭДС $E_2 = 4{,}44 f\ w_{ax} \Phi_m = U_{20} = U_1 w_{ax}/w_{AX} = U_1/k$, где w_{AX} и w_{ax} — числа витков, включенных соответственно между зажимами $A - X$ и $a - x$; $k = w_{AX}/w_{ax}$ — коэффициент трансформации.

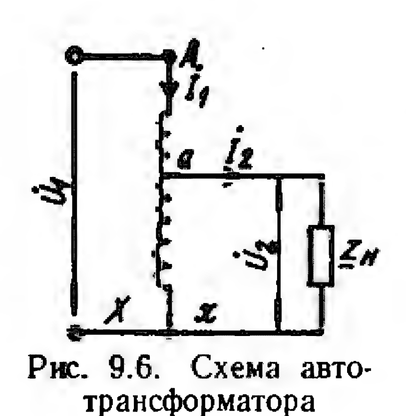


Рис. 9.6. Схема автотрансформатора

Сравним соотношения обычного трансформатора с автотрансформатором в режиме нагрузки, при котором, как и в п. 8.10, пренебрежем током холостого хода. Если бы обмотки $A - X$ и $a - x$ были связаны между собой только электромагнитно, т. е. как в обычном трансформаторе, то в этом случае уравнение МДС (8.18) имело бы вид $\dot I_1 w_{AX} = - \dot I_2 w_{ax}$, откуда

$$\dot I_1 = -\dot I_2 \frac{w_{ax}}{w_{AX}} = -\dot I_2 \frac{1}{k}. \qquad (9.2)$$

Однако ток I_1 течет только по части обмотки $A - a$, а на участке $a - x$ проходит ток, равный геометрической сумме $(\dot I_1 + \dot I_2)$; тогда с учетом (9.2)

$$\dot I_{ax} = \dot I_1 + \dot I_2 = -\dot I_2 \frac{1}{k} + \dot I_2 = \dot I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right). \qquad (9.3)$$

Оказывается, что ток во «вторичной» обмотке автотрансформатора меньше вторичного тока в обычном трансформаторе; это значит, что при одной и той же плотности тока сечение провода «вторичной» обмотки автотрансформатора может быть меньше, чем у обычного трансформатора.

Часть обмотки $A - a$ должна иметь то же сечение, что и у обычного трансформатора, так как по ней проходит ток I_1. Однако ее число витков

$$w_{Aa} = w_{AX} - w_{ax} = w_{AX} - w_{AX}/k = w_{AX}(1 - 1/k) \qquad (9.4)$$

меньше, чем у первичной обмотки обычного трансформатора.

Таким образом, согласно уравнениям (9.3) и (9.4), затраты меди в автотрансформаторе в целом также могут быть меньше, чем у обычного трансформатора. Уменьшение количества обмоточной меди в такой же степени вызовет и уменьшение в ней электрических потерь.

Для любого трансформатора существует понятие *расчетной* (электромагнитной) мощности, которой определяются все его размеры: $S_р = EI$. Согласно выражениям (8.4), ЭДС E_1 и E_2 пропорциональны магнитному потоку, который можно представить как произведение индукции B на площадь поперечного сечения стали магнитопровода $q_с$; значит, $\Phi = Bq_с$ и, введя некоторую постоянную c, получим $E = cBq_с$. Если плотность тока в обмотке j, а площадь поперечного сечения проводника (меди) $q_м$, то $I = jq_м$. Следовательно, $S_р = c\,(Bq_с)\,(jq_м)$, т. е. при заданных значениях

В и J размеры магнитопровода и обмотки определяются значением мощности $S_р$.

В обычном трансформаторе расчетная мощность обеих обмоток

$$S_р = E_1 I_1 + E_2 I_2. \qquad (9.5)$$

Расчетная мощность автотрансформатора может быть представлена в виде суммы мощностей на участках $A - a$ и $a - x$, т. е.

$$S_{р.а} = S_{рAa} + S_{рax} = E_{Aa} I_1 + E_2 I_{ax}. \qquad (9.6)$$

С учетом (9.4)

$$E_{Aa} = E_1 \frac{w_{Aa}}{w_{AX}} = E_1 \left(1 - \frac{1}{k}\right). \qquad (9.7)$$

Подставив (9.3) и (9.7) в (9.6), получим

$$S_{р.а} = E_1 I_1 (1 - 1/k) + E_2 I_2 (1 - 1/k) = \\ = (E_1 I_1 + E_2 I_2)(1 - 1/k). \qquad (9.8)$$

Разделив (9.8) на (9.5), увидим, что расчетная мощность автотрансформатора и, значит, его размеры составляют часть мощности обычного трансформатора:

$$S_{р.а}/S_р = (1 - 1/k) = k_в. \qquad (9.9)$$

Величину $k_в$ называют *коэффициентом выгодности*. Очевидно, *чем меньше значение k, тем меньше и $k_в$, т. е. тем выгоднее применение автотрансформатора.*

Физически это объясняется тем, что в автотрансформаторе часть энергии передается из первичной цепи во вторичную гальваническим путем (по проводам), так как вторичная цепь электрически связана с первичной. При $k > 2$ выгодность применения автотрансформатора уменьшается; поэтому обычно $k = 1{,}2 \div 2$, соответственно $k_в = 0{,}17 \div \div 0{,}5$.

Автотрансформаторы малой мощности широко используют в устройствах связи и автоматики, радиоаппаратуре и лабораторных стендах. В последнее время применяют также автотрансформаторы большой мощности, посредством которых соединяют высоковольтные сети различных напряжений (110, 154, 220, 330, 500 кВ).

Существенным *недостатком автотрансформаторов является то, что вторичная цепь у них электрически соединена с первичной.* Поэтому обмотка НН и подключенные к

ней потребители должны иметь такую же изоляцию по отношению к земле, как обмотка ВН и первичная цепь. По этой же причине в целях обеспечения электробезопасности не допускается применение автотрансформаторов для питания цепей низкого напряжения от сети высокого напряжения.

9.5. Сварочный трансформатор

При ручной дуговой электросварке используют трансформаторы с напряжением при холостом ходе $U_{20} = 60 \div 75$ В.

Для ограничения тока короткого замыкания в момент зажигания дуги и обеспечения устойчивого горения при некотором изменении ее длины (колебание электрода) трансформатор должен иметь круто спадающую внешнюю характеристику (рис. 9.7, *а*), для чего сварочную цепь выполняют с большой индуктивностью ($\cos \varphi = 0{,}4 \div 0{,}5$). Для регулирования сварочного тока в пределах характеристик *1* и *2* на рис. 9.7, *а* эта индуктивность должна быть изменяемой.

Для этих целей в сварочную цепь включают реактор (рис. 9.7, *б*), у которого с помощью соответствующего механизма изменяют зазор δ. При уменьшении зазора индуктивность реактора возрастает, $\cos \varphi$ уменьшается и характеристика смещается в сторону кривой *1*, а значение сварочного тока уменьшается от I_{22} до I_{21} при напряжении горения дуги $U_д \approx 30$ В.

По условиям безопасности работы для целей электросварки нельзя использовать автотрансформаторы, имеющие гальваническую связь между первичной и вторичной цепями, так как сварщик может попасть под полное напряжение первичной цепи.

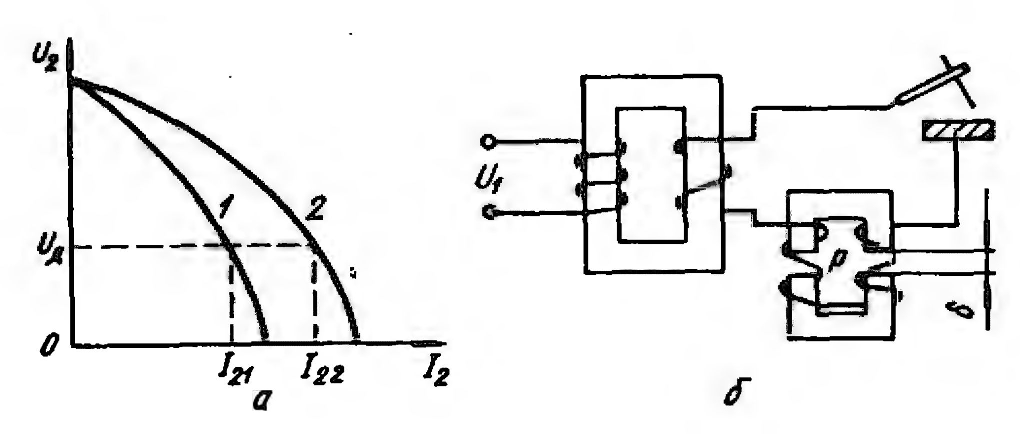


Рис. 9.7. Внешние характеристики (*а*) и схема (*б*) сварочного трансформатора с реактором

9.6. Измерительные трансформаторы

Эти трансформаторы используют в цепях переменного тока для измерения больших значений напряжений (свыше 250 В) и токов (свыше нескольких десятков ампер). При этом обеспечивается безопасность работ, так как электроизмерительные приборы отделяются от цепей высокого напряжения, а также появляется возможность использовать сравнительно недорогие стандартные приборы, предназначенные для измерения малых токов и напряжений (амперметры на 1; 2; 2,5 и 5 А, вольтметры на 100 В).

Трансформаторы напряжения. Служат для включения вольтметров, катушек напряжения ваттметров, фазометров и различных реле. Трансформатор напряжения выполняется в виде двухобмоточного понижающего трансформатора, вторичная обмотка которого в целях безопасности обслуживающего персонала заземляется.

Известно, что сопротивления обмоток вольтметров чрезвычайно велики, по ним текут ничтожно малые токи; поэтому можно считать, что нормальным рабочим режимом трансформатора напряжения является *холостой ход*. В этом режиме, согласно (8.26) и (8.6), с достаточной степенью точности можно считать $U_2' = E_2' = E_1 \approx U_1 \approx U_2 k$. В действительности токи в обмотках трансформатора создают некоторое падение напряжения, вызывающие погрешности при измерениях. Очевидно, эти погрешности будут тем меньше, чем меньше полные сопротивления обмоток Z_1, Z_2 и потери в стали; последние уменьшают, применяя магнитопроводы большого сечения (ненасыщенные), изготовленные из высококачественной стали.

Трансформаторы тока. Служат для включения амперметров, токовых катушек ваттметров и т. п. Трансформаторы тока выполняются в виде двухобмоточного повышающего трансформатора, первичная обмотка которого включается последовательно в измерительную цепь, или в виде проходного трансформатора, у которого первичной обмоткой служит провод, проходящий через окно магнитопровода.

Сопротивления обмоток амперметров, представляющих нагрузку трансформатора, очень малы; значит, исчезающе малы и падения напряжения в них, т. е. $U_2 \approx 0$. Поэтому можно считать, что нормальным рабочим режимом трансформатора тока является *короткое замыкание*. В этом режиме, согласно (8.23, в) и (8.20), $I_1 \approx I_2' = I_2/k$. В действительности из-за наличия тока холостого хода возникает некоторая погрешность при измерениях, для уменьшения кото-

рой магнитопроводы выполняют большого сечения (ненасыщенные) из высококачественной стали. При этих условиях ток I_0 будет минимальным.

Следует особо подчеркнуть, что вторичную обмотку при работе трансформатора тока **недопустимо размыкать** или **оставлять разомкнутой перед включением.** В этом случае трансформатор переходит в режим холостого хода, при котором в десятки и даже сотни раз возрастают магнитный поток, индукция и потери в стали магнитопровода (ср. режимы п. 8.8 и 8.9), трансформатор перегревается и может сгореть. Но еще бо́льшую опасность представляет резкое повышение напряжения на зажимах вторичной обмотки. Если при нормальном рабочем режиме (короткое замыкание) $U_2 \approx 0$, то при переходе в режим холостого хода напряжение U_2 может достичь нескольких сот и даже тысяч вольт, что представляет большую опасность для обслуживающего персонала. Для предотвращения случайного режима холостого хода необходимо перед отключением приборов замыкать обмотку накоротко.

Контрольные вопросы

1. Каковы назначение и принцип выполнения трехфазных трансформаторов?
2. Как маркируются выводы обмоток трехфазных трансформаторов?
3. Какие существуют основные схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов, их условные обозначения?
4. Что называют группой трансформатора, чем она определяется?
5. Какие группы можно получить при различных схемах соединения трехфазных трансформаторов?
6. Какие условия следует соблюдать при включении трансформаторов на параллельную работу?
7. Что такое автотрансформатор, каков принцип его работы?
8. Сравните выполнение обмоток обычного трансформатора и автотрансформатора, в чем выгодность применения последнего?
9. Что называется расчетной мощностью, почему ею определяются размеры и масса трансформатора?
10. Сравните расчетные мощности обычного трансформатора и автотрансформатора; когда выгодность применения последнего наибольшая?
11. Где используют автотрансформаторы? В чем заключается их недостаток, сужающий область применения?
12. Как получить крутоспадающую внешнюю характеристику сварочного трансформатора и регулировать значение его тока?
13. Для чего предназначены измерительные трансформаторы?
14. Каков рабочий режим работы трансформатора напряжения, чем вызываются погрешности измерений при работе с ним?
15. Каков рабочий режим работы трансформатора тока, чем вызываются погрешности измерений при работе с ним? Можно ли размыкать его вторичную обмотку?

Раздел третий
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Глава 10. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

10.1. Принцип выполнения обмоток статора

Электрические машины, рассматриваемые в настоящем разделе (асинхронные и синхронные), несмотря на различия в устройстве и рабочих свойствах, имеют много общего в принципе работы и теории. Принцип действия простейшего генератора переменного тока (см. рис. В.1) рассмотрен в п. В.2. Наличие контактных колец и щеток в цепи якоря является его существенным недостатком, так как при значительном токе и высоком напряжении работа скользящего контакта становится ненадежной. Поэтому, пользуясь свойством кинематической обратимости электрических машин (см. п. В.4), *обмотку якоря размещают на статоре* (далее будем эту обмотку называть *статорной*). Осуществить подвод тока к ротору машины, на котором расположен индуктор (синхронные машины), значительно проще ввиду небольшой мощности и низкого напряжения цепи возбуждения.

В соответствии с принятой системой переменного тока статорные обмотки выполняют, как правило, трехфазными. Выполнить такую обмотку можно из обычной обмотки якоря постоянного тока (см. рис. 3.5), если отсоединить коллектор со щетками и разделить ее на три равные части; получена *трехзонная* обмотка, соединенная треугольником (рис. 10.1, *а*).

Запомним, что выводы обмоток общепромышленных и тяговых машин, согласно ГОСТ 183—74, обозначаются следующим образом: C_1, C_2 и C_3 — начала, а C_4, C_5 и C_6 — соответствующие им концы фаз. Однако по причинам методического характера с целью лучшего усвоения и преемственности излагаемого материала сохраним здесь обозначения выводов фаз, как у трансформаторов.

Если обмотка размещена на окружности статора радиусом R, то при очень большом числе проводников (пазов) дуга AB, равная $^1/_3$ длины окружности, будет эквивалентна алгебраической сумме наведенных в них ЭДС, а хорда AB соответствует их геометрической сумме, дающей напряжение между выводами A и B.

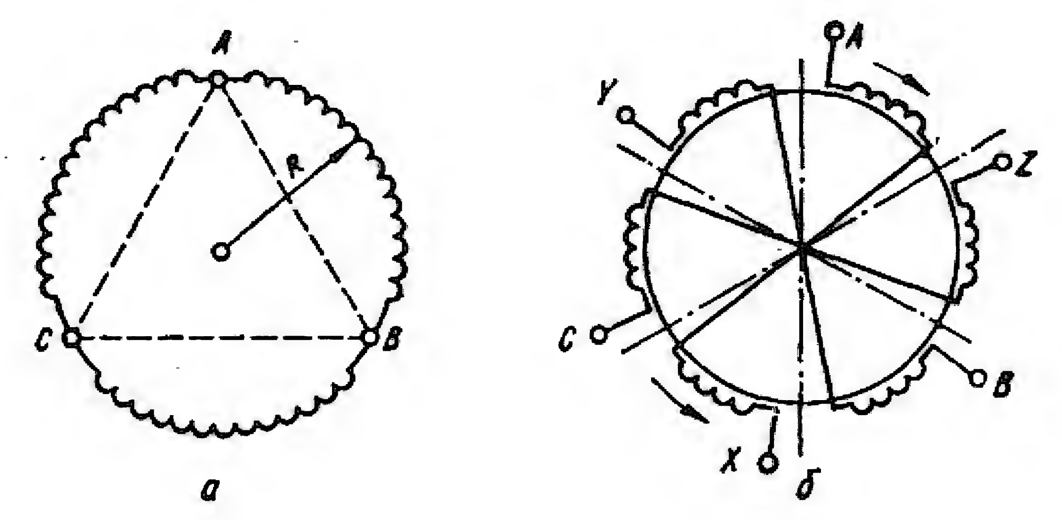


Рис. 10.1. Принципы выполнения трехфазной обмотки с тремя (*а*) и шестью (*б*) зонами

Отношение геометрической суммы ЭДС секций фазы обмотки к их алгебраической сумме является мерой использования обмотки и называется *коэффициентом распределения.* В данном случае

$$k_p = \frac{AB}{\smile AB} = \frac{R\sqrt{3}}{2\pi R/3} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0{,}827.$$

Таким образом, при трехзонной обмотке ЭДС фазы на выводах *A* и *B* на 17,3 % меньше алгебраической суммы ЭДС, наведенной в фазе. Иначе говоря, имеет место значительное недоиспользование обмотки.

Лучший результат может быть получен при разделении окружности на шесть зон. При этом каждая фаза будет состоять из двух полуфаз (рис. 10.1, *б*), сдвинутых одна относительно другой на 180° эл. Чтобы ЭДС противоположных полуфаз (например, *A* и *X*) действовали по контуру согласно, нужно соединить перемычкой *концы* полуфаз *A* и *X*. Наличие перемычки является недостатком такого способа соединения, однако коэффициент распределения *шестизонной* обмотки

$$k_p = \frac{R}{2\pi R/6} = \frac{3}{\pi} = 0{,}955,$$

т. е. в этом случае теряется только 4,5 % наведенной ЭДС. Поэтому обмотки переменного тока выполняют, как правило, шестизонными.

Чтобы все полуфазы обмотки с зоной 60° эл. были одинаковыми, нужно иметь равное и целое число пазов в каждой зоне, т. е. число пазов, приходящихся на полюс и фазу,

$$q = \frac{z}{2pm}, \qquad (10.1)$$

где z — число пазов всей обмотки; p — число пар полюсов машины; m — число фаз.

Обмотка статора состоит из катушек, выполненных аналогично катушкам якорной обмотки машины постоянного тока. Ее можно соединить треугольником или звездой. Если машина имеет p пар полюсов, то окружность статора делится на $6p$ частей. Число полуфаз в каждой фазе равно числу полюсов $2p$. Пары полюсов могут быть соединены последовательно или параллельно.

В общем случае индукция магнитного поля на длине двойного полюсного деления распределяется по несинусоидальной кривой, вызывая наведение ЭДС по форме, аналогичной той, которая была изображена на рис. В.4, *а*. Эта симметричная относительно оси абсцисс кривая носит периодический характер. Следовательно, ее можно разложить в ряд гармонических составляющих (ряд Фурье), представляющих собой сумму синусоид нечетного порядка. Действующие значения ЭДС этих составляющих равны E_1, E_3, E_5, ..., E_n.

Согласно теории переменных токов, действующее значение результирующей ЭДС

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \cdots + E_n^2} =$$
$$= E_1 \sqrt{1 + (E_3/E_1)^2 + (E_5/E_1)^3 + \cdots + (E_n/E_1)^2}.$$

Простым вычислением легко убедиться в том, что высшие гармонические составляющие слабо влияют на результирующую ЭДС; они только искажают ее форму. Поэтому в дальнейшем для простоты изложения распределение индукции на длине двойного полюсного деления 2τ и наведенную ЭДС будем считать синусоидальными.

Чтобы не иметь высших гармонических составляющих ЭДС, обмотки выполняют с укороченным шагом, т. е. $y_1 < \tau$. При этом, как и в машинах постоянного тока (см. п. 3.1), несколько уменьшается значение ЭДС. Известно, что в трехфазных обмотках, соединенных треугольником или звездой, гармонические составляющие токов и ЭДС, кратные трем, отсутствуют. Рассмотрим, каким образом укорочение обмотки оказывает влияние на уничтожение пятой гармоники.

На рис. 10.2, *а* показано распределение в воздушном зазоре магнитной индукции первой B_1 и пятой B_5 гармоник. Если обмотка выполнена с диаметральным шагом ($y_1 = \tau$), то ЭДС первой и пятой гармоник (e_1 и e_5) в обеих сторонах секции (рис. 10.2, *б*) складываются арифметически: резуль-

тирующая ЭДС $e_{к.д}$ содержит наряду с первой и пятую гармонику.

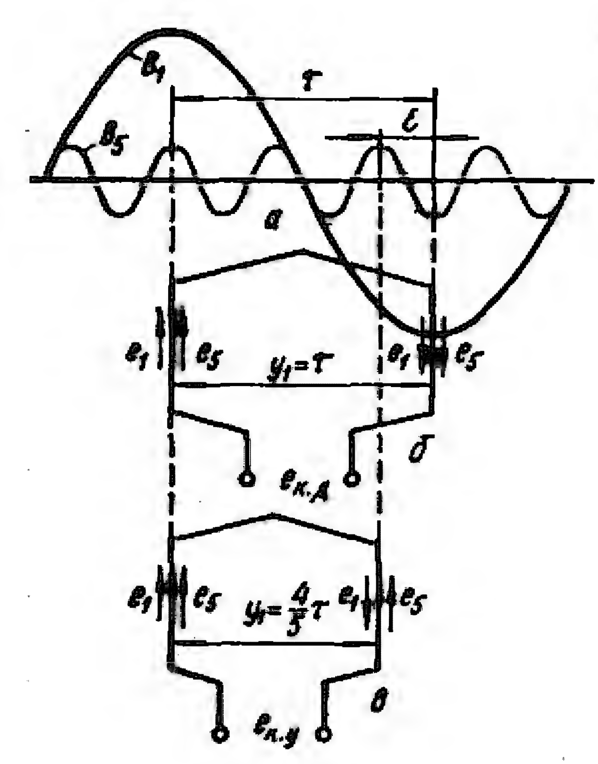


Рис. 10.2. Устранение ЭДС пятой гармоники

Если шаг секции укоротить на $\varepsilon = (^1/_5)\ \tau$, т. е. иметь $y_1 = \frac{4}{5}\ \tau$, то ЭДС e_5 в обеих сторонах секции будут направлены встречно и их сумма станет равна нулю (рис. 10.2, *в*): результирующая ЭДС $e_{к.у}$ содержит только первую гармонику. Очевидно, для уничтожения 7-й гармоники следует принять $y_1 = \frac{6}{7}\ \tau$.

Чтобы одновременно существенно ослабить 5-, 7-ю и кратные им гармоники, принимают $y_1 = (0{,}8 \div 0{,}85)\ \tau$. Остальные гармоники (11-, 13-, 17-я и т. д.) не оказывают существенного влияния на работу машины.

Из рис. 10.2, *в* видно, что при укорочении несколько уменьшилась суммарная ЭДС первой гармоники, т. е. $E_{1у} < E_{1д}$. Это уменьшение учитывают *коэффициентом укорочения:*

$$k_{y_1} = E_{1у}/E_{1д} = \sin(90°y_1/\tau).$$

Магнитным потоком Ф, частота которого f_1, в фазе статора с числом витков w_1 наводится ЭДС, действующее значение которой определяется формулой, аналогичной (8.4):

$$E_1 = 4{,}44k_{p_1}k_{у_1}f_1w_1Ф = 4{,}44k_{об_1}f_1w_1Ф, \qquad (10.2)$$

где произведение $k_{p_1}k_{у_1} = k_{об_1} = (0{,}9 \div 0{,}94)$ называется *обмоточным коэффициентом.*

10.2. Создание вращающегося магнитного поля

Пульсирующее поле. При питании обмотки однофазным переменным током создается пульсирующее магнитное поле, вектор индукции которого в течение периода T, соответствующего углу 2π рад, изменяется от нуля до $+B_m$, снова до нуля, далее до $-B_m$ и вновь до нуля. (Это справедливо, если пренебречь магнитными сопротивлениями ферромагнитных частей машины).

На рис. 10.3, *а* распределение индукции показано в мо-

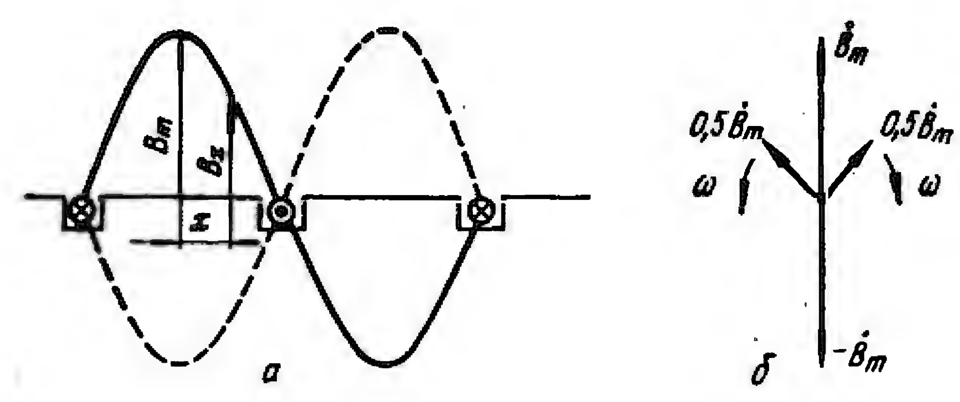


Рис. 10.3. Распределение индукции в воздушном зазоре (*а*) и разложение вектора пульсирующего поля на два вращающихся (*б*)

мент времени, соответствующий $\omega t = \frac{\pi}{2}$. В общем случае индукция по оси обмотки равна $B_m \sin \omega t$. В каждой точке воздушного зазора, расположенной на расстоянии x от оси обмотки, будет индукция

$$B_x = B_m \sin \omega t \cos x =$$
$$= 0{,}5B_m \sin(\omega t - x) + 0{,}5B_m \sin(\omega t + x). \quad (10.3)$$

Каждый из членов правой части (10.3) представляет собой бегущую (вращающуюся) волну с амплитудой $0{,}5B_m$, причем одна вращается против, а другая — по ходу часовой стрелки. Действительно, x выбрано произвольно; значит, всегда $\omega t - x = \text{const}$ (или $\omega t + x = \text{const}$); тогда

$$x + \text{const} = \omega t, \quad (10.4)$$

т. е. координата x непрерывно увеличивается (по окружности) со временем t.

Скорость вращения волны можно определить, продифференцировав выражение (10.4); тогда с учетом (В.3)

$$dx/dt = \omega = 2\pi f = 2\pi p n. \quad (10.5)$$

Итак, пульсирующее магнитное поле можно представить в виде двух вращающихся в противоположные стороны полей. При повороте на угол 360° эл., или 2π рад, каждый вектор $0{,}5\mathbf{B}_m$ описывает окружность (рис. 10.3, *б*); такое поле называется *круговым*.

Круговое поле при трехфазной обмотке. При выяснении принципа выполнения трехфазного трансформатора (см. п. 9.1) было показано, что суммарный магнитный поток трех обмоток, по которым текут синусоидальные токи, *сдвинутые во времени* на угол 120°, или $\frac{2\pi}{3}$ рад, но магнитные оси которых совпадают, равен нулю [см. (9.1)].

Трехфазная обмотка статора равномерно распределена по окружности (рис. 10.1), и магнитные оси фаз a, b и c

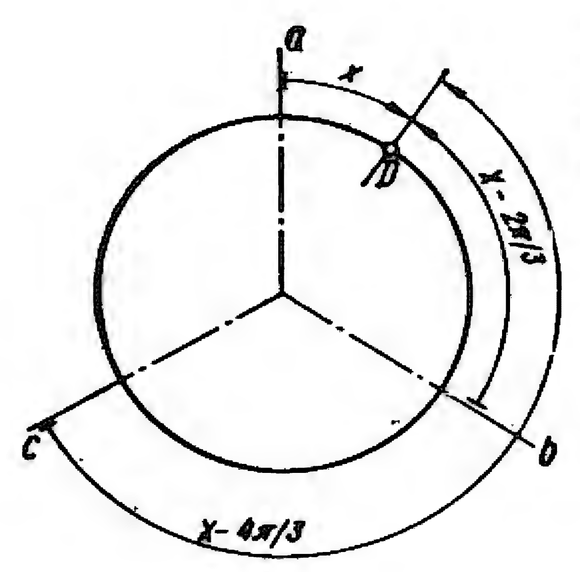


Рис. 10.4. К определению результирующей индукции в точке D трехфазной обмотки

сдвинуты в пространстве на угол 120° эл., или $2\pi/3$ рад. Магнитные индукции фаз равны соответственно: $B_a = B_m \sin \omega t$, $B_b = B_m \sin \times (\omega t - 2\pi/3)$, $B_c = B_m \sin \times (\omega t - 4\pi/3)$.

Определим результирующую индукцию в произвольно взятой точке D (рис. 10.4), отстоящей от оси a на расстоянии x (сдвиг по ходу часовой стрелки). Для этого спроектируем векторы $\mathbf{B}_a$, $\mathbf{B}_b$ и $\mathbf{B}_c$ на ось, проходящую через точку D, принимая во внимание, что от осей b и c точка D отстоит соответственно на расстоянии $x - 2\pi/3$ и $x - 4\pi/3$ (сдвиг против хода часовой стрелки). Каждая фаза создает пульсирующее магнитное поле, поэтому аналогично (10.3) получим индукцию в точке D от каждой из фаз:

$$B_{ax} = B_m \sin \omega t \cos x = 0{,}5B_m \sin(\omega t - x) + 0{,}5B_m \sin(\omega t + x); \quad (10.6,\text{ а})$$

$$B_{bx} = B_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) = 0{,}5B_m \sin(\omega t - x) + 0{,}5B_m \sin\left(\omega t + x - \frac{4\pi}{3}\right); \quad (10.6,\text{ б})$$

$$B_{cx} = B_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\cos\left(x - \frac{4\pi}{3}\right) = 0{,}5B_m \sin(\omega t - x) + 0{,}5B_m \sin\left(\omega t + x - \frac{8\pi}{3}\right). \quad (10.6,\text{ в})$$

Получено шесть вращающихся магнитных полей, причем три из них [вторые члены уравнений (10.6)] взаимно уничтожают друг друга, так как

$$\sin(\omega t + x) + \sin\left(\omega t + x - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + x - \frac{8\pi}{3}\right) = 0.$$

Таким образом, результирующая индукция в точке D будет

$$B_{\text{рез}} = B_{ax} + B_{bx} + B_{cx} = 1{,}5B_m \sin(\omega t - x), \quad (10.7)$$

т. е. трехфазная обмотка создает волну с амплитудой $1{,}5B_m$, вращающуюся в пространстве со скоростью ω.

На основании изложенного сделаем важный вывод: *вращающееся поле может быть образовано многофазной обмоткой при наличии одновременного сдвига фаз во времени и в пространстве.*

При симметричном сдвиге во времени и симметрии токов, проходящих по фазам, а также при симметричном расположении этих фаз в пространстве поле является круговым.

Амплитуда результирующей волны расположена там, где в данный момент составляющая индукция максимальна (т. е. максимален ток фазы). Действительно, $B_{рез} = 1{,}5B_m$, когда $\sin(\omega t - x) = 1$, т. е. при $\omega t - x = \pi/2$, откуда $x = \omega t - \pi/2$. Если в данный момент ток максимален в фазе $A - X$, то $i_a = I_m \sin \omega t = I_m \sin \frac{\pi}{2} = I_m$, т. е. $\omega t = \frac{\pi}{2}$ и $x = 0$ (точка D на рис. 10.4 лежит на оси a).

Итак, результирующая волна магнитной индукции пересекает оси фаз обмотки в такой последовательности, в какой токи в фазах проходят через максимум. Отсюда вытекает важный практический вывод: *для изменения направления вращения магнитного поля необходимо изменить порядок чередования фаз,* т. е. поменять местами присоединение выводов двух фаз к сети.

Круговое поле при двухфазной обмотке. В симметричной двухфазной обмотке магнитные оси взаимно перпендикулярны, а токи сдвинуты во времени на угол $\pi/2$.

Магнитные индукции по осям фаз равны $B_a = B_m \sin \omega t$ и $B_b = B_m \sin(\omega t - \pi/2)$. Рассуждая аналогично, найдем индукцию в точке D, отстоящей от оси a на расстоянии x:

$$B_{ax} = B_m \sin \omega t \cos x =$$

$$= 0{,}5B_m \sin(\omega t - x) + 0{,}5B_m \sin(\omega t + x);$$

$$B_{bx} = B_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(x - \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= 0{,}5B_m \sin(\omega t - x) + 0{,}5B_m \sin(\omega t + x - \pi).$$

Поскольку $\sin(\omega t + x) + \sin(\omega t + x - \pi) = 0$, уравнение бегущей волны примет вид

$$B_{рез} = B_{ax} + B_{bx} = B_m \sin(\omega t - x), \qquad (10.8)$$

т. е. двухфазная обмотка создает волну с амплитудой B_m, а скорость ее равна ω.

Круговое поле при m-фазной обмотке. Обратим внимание, что амплитуда результирующего поля двухфазной обмотки

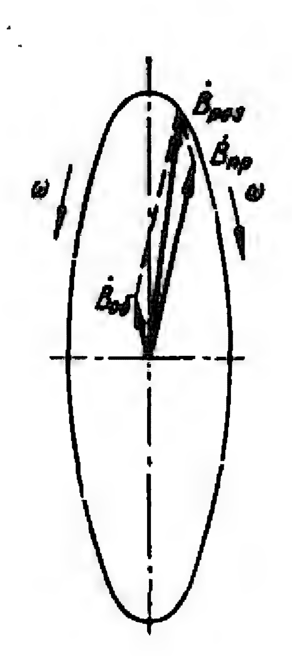


Рис. 10.5. Образование эллиптического вращающегося магнитного поля

$B_{рез} = B_m = \frac{2}{2} B_m$, а у трехфазной обмотки $B_{рез} = 1{,}5 B_m = \frac{3}{2} B_m$.

При симметричной m-фазной обмотке, когда фазы сдвинуты в пространстве на угол $\frac{2\pi}{m}$ рад, а токи во времени — на этот же угол, уравнение бегущей волны имеет вид

$$B_{рез} = \frac{m}{2} B_m \sin(\omega t - x) \qquad (10.9)$$

Итак, любая симметричная m-фазная обмотка создает вращающееся магнитное поле, амплитуда которого равна $\frac{m}{2} B_m$, а скорость — ω.

Эллиптическое поле. При несоблюдении хотя бы одного из условий образования кругового поля результирующий вектор магнитной индукции описывает в пространстве эллипс. Из рис. 10.5 видно, что вектор $\mathbf{B}_{рез}$, описывающий эллипс, можно представить в виде суммы двух векторов: $\mathbf{B}_{пр}$ — прямого и $\mathbf{B}_{об}$ — обратного, вращающихся в разные стороны с одинаковыми скоростями ω.

Доказательством этому является известное положение о том, что любую несимметричную многофазную систему можно проанализировать, используя метод симметричных составляющих. Так, несимметричная трехфазная система может быть разложена на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Последняя, не имея временнóго сдвига, не образует вращающегося поля, а создает только добавочные потери энергии. Поэтому эллиптическое поле можно рассматривать как результат сложения двух разных по величине и вращающихся в противоположные стороны круговых полей. Практически это приводит к тому, что обратное поле «тормозит» ротор, уменьшая эффективность действия прямого поля (см. гл. 11). Такое явление может иметь место, если к электрической машине по тем или иным причинам поступает несимметричное питание.

Контрольные вопросы

1. Где размещена обмотка якоря машины переменного тока, почему?
2. Что такое коэффициент распределения; почему предпочтительно выполнение шестизонных обмоток?
3. Что называют числом пазов на полюс и фазу?
4. С какой целью выполняется укорочение обмоток, какие бывают величины укорочения?
5. Что называют коэффициентами укорочения и обмоточным?
6. Как можно представить пульсирующее поле однофазной обмотки?
7. Чему равна скорость бегущей волны; какое поле называется круговым?
8. Какие существуют условия создания кругового вращающегося поля? Как это доказать при трех-, двух- и m-фазных обмотках?
9. Чему равна амплитуда волны m-фазной обмотки?
10. Что называют эллиптическим полем, как оно может быть представлено и почему возникает?

Глава 11. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

11.1. Принцип действия асинхронного двигателя. Скольжение

Асинхронные машины, как и все остальные, энергетически о б р а т и м ы. Однако выяснить принцип их действия проще, начав с двигателя. Трех- и однофазные (двухфазные) асинхронные двигатели в наибольшей степени используются в промышленности и на транспорте, поэтому теория асинхронных машин изложена здесь применительно к двигательному режиму.

Условимся считать обмотку статора асинхронного двигателя, на которую подается питание из сети, как и у трансформатора, *первичной*, а обмотку ротора — *вторичной* с соответствующими индексами у всех обозначений.

От трансформатора асинхронная машина отличается тем, что между первичной (статором) и вторичной (ротором) частями имеется воздушный зазор, который для улучшения магнитной связи между обмотками делают минимальным (0,3—1,2 мм); кроме того, вторичная часть у асинхронной машины подвижна (вращается).

Если трехфазную обмотку статора, имеющую p пар полюсов, подключить к сети с частотой тока f_1, то появится вращающееся магнитное поле, частота вращения которого, согласно (10.5)

$$n_1 = \omega_1/(2\pi p) = f_1/p. \tag{11.1}$$

Вращающееся магнитное поле статора (поток Ф) пересекает проводники обмотки статора и ротора и индуцирует

в них ЭДС E_1 и E_2; под действием последней в обмотке ротора возникает ток I_2.

Взаимодействие потока статора и тока ротора приводит к появлению электромагнитного вращающего момента. Ротор начинает вращаться с частотой $n < n_1$ в ту же сторону, что и поле статора.

Если представить себе, что ротор вращается с синхронной частотой, т. е. $n = n_1$, то ротор и магнитный поток статора будут неподвижны один относительно другого. При этом поток Ф не будет пересекать проводников ротора, в них не будет индуцироваться ЭДС E_2, не будет тока I_2 и машина работать не сможет.

Таким образом, непременным условием возникновения вращающего электромагнитного момента является несинхронная частота вращения ротора, т. е. $n \neq n_1$. По этой причине машина получила название *асинхронной*.

Относительная разность частот вращения поля статора и ротора называется *скольжением*:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} . \qquad (11.2)$$

Оно характеризует степень «отставания» ротора от поля статора. Скольжение выражают также в процентах; в этом случае (11.2) умножают на 100 %.

Из соотношения (11.2) можно получить выражение частоты вращения ротора:

$$n = n_1 (1 - s). \qquad (11.3)$$

11.2. Устройство асинхронных машин

По конструкции асинхронные машины подразделяют на два основных типа: с *фазным* ротором (с контактными кольцами) и с *короткозамкнутым* ротором; статоры их конструктивно одинаковы.

Сердечники статоров и роторов набирают из листов электротехнической стали, в выштампованных пазах которых укладывают обмотки, имеющие равное число полюсов.

Машина с фазным ротором (рис. 11.1). Трехфазная обмотка статора *1* уложена в пазах его сердечника *2*. На роторе *3* уложена аналогичная обмотка *4*, которая обычно соединена звездой, а ее выводы подсоединены к контактным кольцам *6*, насаженным на вал машины *5*. По кольцам скользят щетки, с помощью которых в цепь ротора можно включить резисторы *7*.

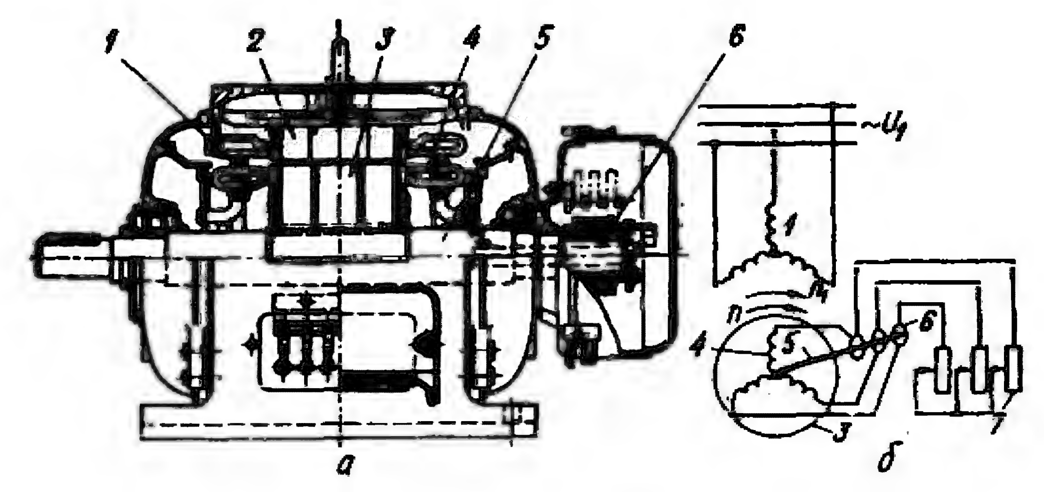


Рис. 11.1. Асинхронная машина с фазным ротором (*а*) и схема ее включения (*б*)

Устройство блока контактных колец показано на рис. 11.2. Контактные кольца *1* изготавливают из бронзы и запрессовывают в пластмассу *2*. От каждого кольца отходит изолированная контактная шпилька *3*. Машины снабжают устройством, позволяющим после пуска в ход поднять щетки с контактных колец, а сами контактные кольца замкнуть при этом накоротко.

Машина с короткозамкнутым ротором (рис. 11.3). Ее сердечник статора *2* с обмоткой *1* аналогичен машине на рис. 11.1.

В пазы сердечника ротора *3* закладывают без изоляции стержни *4*, замыкаемые накоротко с торцов двумя кольцами. При этом обмотка ротора получает вид «беличьей клетки» (рис. 11.4, *а*); она часто так и называется.

Для двигателей большой мощности «беличью клетку» (рис. 11.4, *б*) изготавливают из медных или латунных стержней *2*, концы которых приваривают к короткозамыкающим кольцам *3* по обеим сторонам сердечника *1*; для двигателей средней и малой мощностей ее вместе с торцовыми лопатками *4* (рис. 11.4, *в*), играющими одновременно роль теплорассеивателей и лопастей вентилятора, отливают из алюминия.

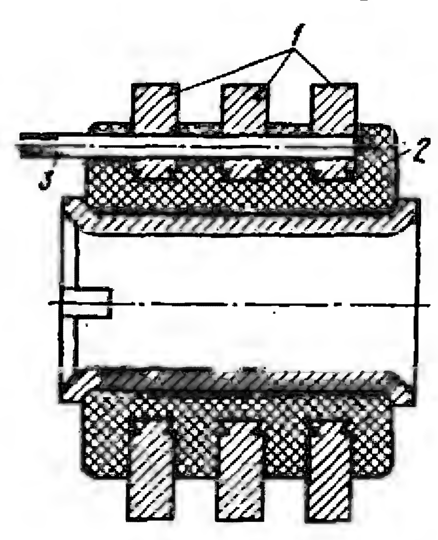


Рис. 11.2. Блок контактных колец

В электрическом отношении «беличья клетка» представляет собой многофазную короткозамкнутую звезду, число фаз которой m_2 равно числу стержней (пазов) ротора *Z₂*, причем в каждую фазу входят

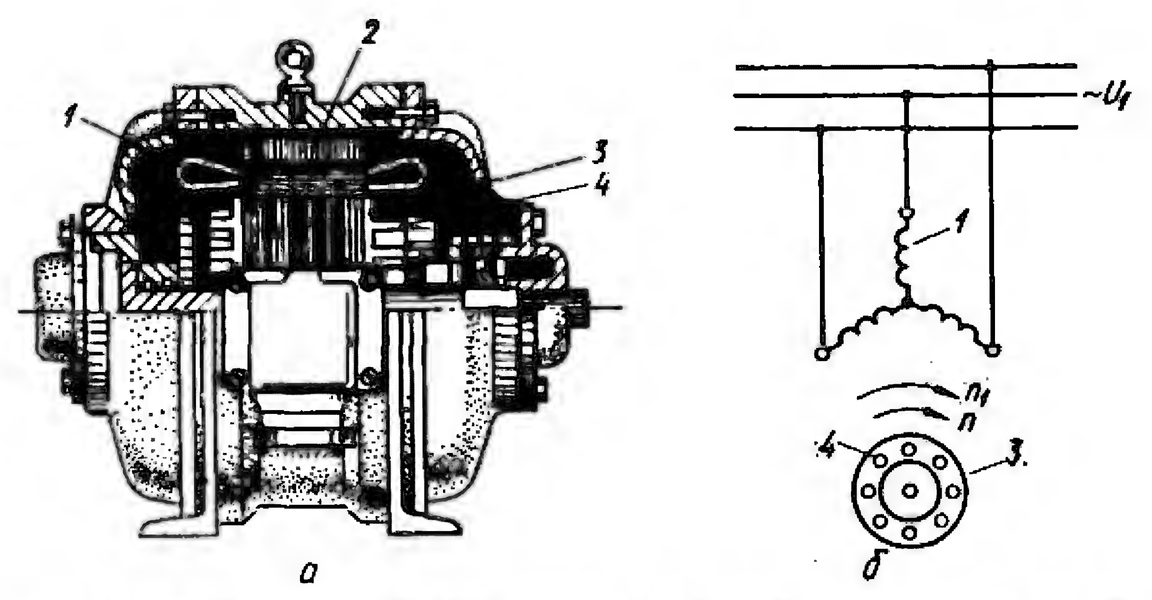


Рис. 11.3. Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором (*а*) и схема ее включения (*б*)

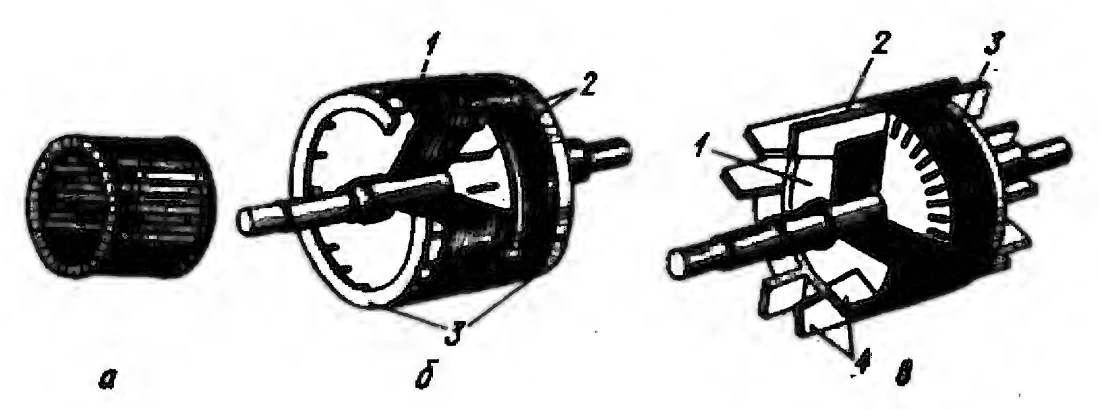


Рис. 11.4. Конструкции короткозамкнутого ротора

один стержень и прилегающие к нему участки короткозамыкающих колец. Поскольку один виток может быть образован, как минимум, двумя проводниками (см., например, рис. 3.2), а фаза имеет один стержень (проводник), число витков в фазе «беличьей клетки» $w_2 = {}^1/_2$.

Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором самая простая, надежная, легкая и дешевая среди всех типов машин, поэтому ее применение на транспорте является перспективным.

11.3. Режимы работы асинхронных машин

Двигательный режим. Этот режим является основным. В момент пуска, когда $n = 0$, согласно (11.2), $s = 1$. Если бы после пуска ротор достиг синхронной частоты вращения $n = n_1$, то скольжение стало бы равно нулю. Таким образом, диапазоны частот вращения и скольжения асинхронного

двигателя следующие:

$$0 < n < n_1; \quad 0 < s < 1.$$

Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называется *номинальным скольжением*. Практически $s_{ном} = 0,01 \div 0,03$, только у малых и специальных (например, тяговых) машин номинальное скольжение $s_{ном} = 0,05 \div 0,07$.

При неподвижном (заторможенном) роторе ($n = 0$) асинхронная машина ничем не отличается от трансформатора. В роторе, как и во вторичной обмотке трансформатора, индуцируется ЭДС E_2, имеющая частоту сети f_1. Если же ротор приведен во вращение с частотой n, то частота вращения магнитного потока Ф относительно ротора согласно (11.1) и (11.2) будет

$$n_2 = n_1 - n = n_1 s, \tag{11.4}$$

а частота индуцируемой в роторе ЭДС

$$f_2 = pn_2 = pn_1 s = f_1 s. \tag{11.5}$$

Если частоту вращения выражать в об/мин, то формула (11.1) примет вид $n_1 = 60\, f_1/p$; при частоте сети $f_1 = 50$ Гц синхронная частота вращения следующим образом зависит от числа полюсов машины:

Число полюсов $2p$	2	4	6	8	10	12	16
n_1, об/мин	3000	1500	1000	750	600	500	375

При $s_{ном} = 0,01 \div 0,03$ в роторе протекает ток I_2, частота которого $f_2 = f_1 s = 50\,(0,01 \div 0,03) = 0,5 \div 1,5$ Гц. Известно, что магнитные потери в стали приблизительно пропорциональны частоте перемагничивания в степени 1,5. Ввиду малости частоты f_2 потери в стали ротора при $s_{ном}$ принимают равными нулю.

Ток в многофазной обмотке ротора вызывает появление вращающегося магнитного поля, которое относительно самого ротора, согласно (10.5), будет вращаться со скоростью $\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi p n_2$. Но так как ротор вращается в пространстве с частотой n, то поле ротора относительно любой неподвижной точки пространства будет вращаться с частотой $n_2 + n$. Приняв во внимание выражение (11.4), получим

$$n_2 + n = n_1 s + n = n_1 \frac{n_1 - n}{n_1} + n = n_1.$$

Итак, поле ротора вращается в пространстве синхронно с полем статора, т. е. эти поля неподвижны одно относительно другого и образуют общее вращающееся поле.

Генераторный режим. Приложив к валу ротора внешний вращающийся момент, ротор можно привести во вращение в направлении вращения поля статора с частотой, выше синхронной ($n > n_1$). В этом случае ротор будет обгонять поле статора, а направление ЭДС и активной составляющей тока ротора по сравнению с двигательным режимом изменится на обратное. Значит, изменится на обратное и направление электромагнитного момента, который станет теперь *тормозным*, а машина начнет работать в режиме генератора, отдавая энергию в сеть.

Частота вращения ротора при этом теоретически может быть сколь угодно большой. Следовательно, асинхронная машина, работая как генератор, характеризуется следующими диапазонами частот вращения и скольжений:

$$n_1 < n < \infty; \quad -\infty < s < 0.$$

Несмотря на исключительную простоту и дешевизну асинхронных машин, а также очень простой перевод их в генераторный режим, асинхронные генераторы применяются очень редко. Дело в том, что, как и трансформатор, асинхронная машина потребляет от сети индуктивный ток намагничивания, причем этот ток из-за наличия воздушного зазора, оказывающего магнитному потоку большое сопротивление, очень велик: он может достигать 30—40 % номинального тока машины. Значит, на три асинхронных генератора нужен один, равный им по мощности, синхронный генератор, который обеспечивал бы первые током намагничивания. Возможно и самовозбуждение асинхронных генераторов, когда к зажимам статора подключается батарея конденсаторов. Но они дороги и имеют большие размеры. Последнее время, в связи с появлением малогабаритных конденсаторов, асинхронные генераторы используют на маленьких электростанциях, использующих энергию ветра.

Режим электромагнитного тормоза. Если неподвижный ротор начать вращать в направлении, обратном направлению вращения поля статора, то возникает *электромагнитный* момент, действующий в направлении вращения поля статора. Он будет тормозить вращающийся против поля ротор.

Такой режим может быть получен, например, когда под действием силы тяжести висящий на крюке груз заставит вращаться против поля ротор кранового двигателя. То же самое произойдет, если у вращающегося асинхронного двигателя, «перебросив» выводы обмотки статора, изменить направление вращения поля, т. е. осуществить противо-

включение. Ротор может быть приведен во вращение «против поля» со сколь угодно большой частотой.

Следовательно, в режиме электромагнитного тормоза асинхронная машина работает при

$$-\infty < n < 0; \quad 1 < s < +\infty.$$

Поэтому частота тока в роторе $f_2 = f_1 s > f_1$, а значит, чрезвычайно велики потери в стали; очень велик и ток I_2. В режиме электромагнитного тормоза асинхронная машина с короткозамкнутым ротором может работать очень короткое время. В цепь фазного ротора для ограничения тока включают добавочный резистор.

11.4. Основные уравнения и схемы замещения асинхронного двигателя

При неподвижном роторе асинхронный двигатель представляет полную аналогию трансформатору, поэтому аналогичны и основные уравнения (см. п. 8.2 и 8.4).

ЭДС статора определяется уравнением (10.2), а ЭДС заторможенного ротора

$$E_2 = 4{,}44 k_{\text{об}_2} w_2 f_1 \Phi. \tag{11.6}$$

Во вращающемся роторе будет индуцироваться ЭДС, которая с учетом (11.5) и (11.6) равна

$$E_{2s} = 4{,}44 k_{\text{об}_2} w_2 f_2 \Phi = 4{,}44 k_{\text{об}_2} w_2 f_1 s \Phi = E_2 s. \tag{11.7}$$

Таким образом, ЭДС вращающегося ротора является функцией скольжения и меньше, чем ЭДС в заторможенном роторе. Аналогично обстоит дело и с индуктивным сопротивлением. При неподвижном роторе $x_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 L_2$, а при вращающемся $x_{2s} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2$; тогда с учетом (11.5)

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2 = x_2 s. \tag{11.8}$$

При рабочем процессе обмотка ротора двигателя замкнута накоротко; следовательно, $U_2 = 0$. По тем же причинам, что и у трансформатора, и при соблюдении тех же условий у асинхронного двигателя проводят приведение вторичной обмотки к первичной.

На основании изложенного можно записать три основных уравнения асинхронного двигателя:

аналогично выражению (8.10)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \tag{11.9}$$

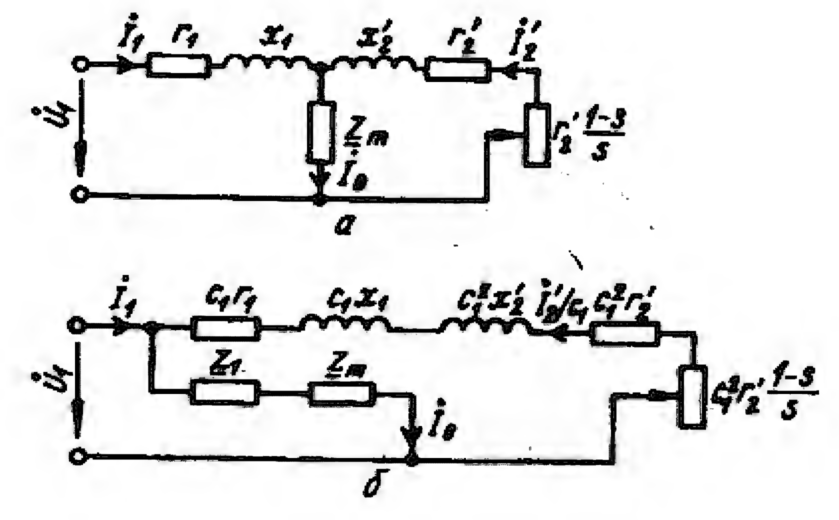


Рис. 11.5. Схемы замещения асинхронного двигателя

аналогично выражениям (8.12) и (8.23, б)

$$\dot{E}'_{2s} - j\dot{I}'_2 x'_{2s} - \dot{I}'_2 r'_2 = 0.$$

Разделив все члены на s, с учетом (11.7) и (11.8) получим

$$\dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2/s = 0,$$

или окончательно

$$\dot{E}'_2 = j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}'_2 r'_2/s = \dot{I}'_2\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2\right). \qquad (11.10)$$

Аналогично выражению (8.23, в)

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \qquad (11.11)$$

Уравнения (11.9), (11.10) и (11.11) позволяют построить векторную диаграмму, а также, как и для трансформатора (см. п. 8.7), схему замещения; при этом целесообразно представить величину r'_2/s, состоящей из двух составляющих:

$$r'_2/s = r'_2 + r'_2(1 - s)/s.$$

Такая Г-образная схема замещения асинхронного двигателя изображена на рис. 11.5, *а*. Сравнение ее с рис. 8.5, *в* показывает, что асинхронный двигатель при заданном скольжении s можно рассматривать как трансформатор, к выводам вторичной обмотки которого подключена чисто активная нагрузка $r'_2(1 - s)/s$. Эта нагрузка — единственный переменный параметр схемы. Если $s \approx 0$, то $r'_2(1 - s)/s \approx \infty$, что и соответствует режиму холостого хода. Когда ротор неподвижен ($s = 1$), то $r'_2(1 - s)/s = 0$, что соответствует режиму короткого замыкания.

Т-образная схема замещения представляет собой сложную разветвленную цепь, при расчете которой встречаются значительные затруднения. Поэтому при изучении режима нагрузки трансформатора (см. п. 8.10), пренебрегая цепью намагничивания и током холостого хода, получали простую схему замещения на рис. 8.7, *а*. При рассмотрении работы асинхронного двигателя этого сделать нельзя: ввиду большого значения тока холостого хода (см. п. 11.3) ошибка получилась бы значительной.

Для упрощения расчетов Т-образную схему замещения преобразовывают в Г-образную (рис. 11.5, *б*), которая состоит из двух самостоятельных параллельных ветвей. Сущность этого преобразования заключается в том, что производят такое изменение параметров схемы, при котором токи I_1 и I_0 при данном напряжении U_1 остаются неизменными. Поэтому последовательно с вынесенной на зажимы цепью намагничивания (Z_m) включают полное сопротивление обмотки статора (Z_1), а остальные параметры схемы изменяют с помощью коэффициента c_1, как показано на рис. 11.5, *б*.

Можно показать, что $c_1 \approx 1 + x_1/x_m$, причем для двигателей мощностью 1—10 кВт $c_1 \approx 1{,}04 \div 1{,}06$, а для более мощных $c_1 \approx 1{,}02 \div 1{,}04$. Поэтому на практике часто принимают $c_1 = 1$, получая *упрощенную Г-образную схему замещения.*

Согласно закону Ома, приведенный ток ротора в упрощенной схеме замещения (на рис. 11.5, *б* при $c_1 = 1$)

$$I_2' = U_1/\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}. \qquad (11.12)$$

11.5. Рабочий процесс и энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Асинхронная машина является универсальным преобразователем. Действительно, в ней подведенное к статору напряжение U_1 преобразуется в напряжение на роторе $U_р = I_2 r_2 (1 - s)/s$, число фаз статора m_1 можно преобразовать в число фаз ротора m_2, частота статора f_1 преобразуется в частоту ротора f_2 и, наконец, подведенная электрическая мощность P_1 — в механическую мощность на валу двигателя P_2.

Указанные преобразования сопровождаются потерями энергии, поэтому рабочий процесс асинхронного двигателя удобно представить с помощью энергетической диаграммы (рис. 11.6).

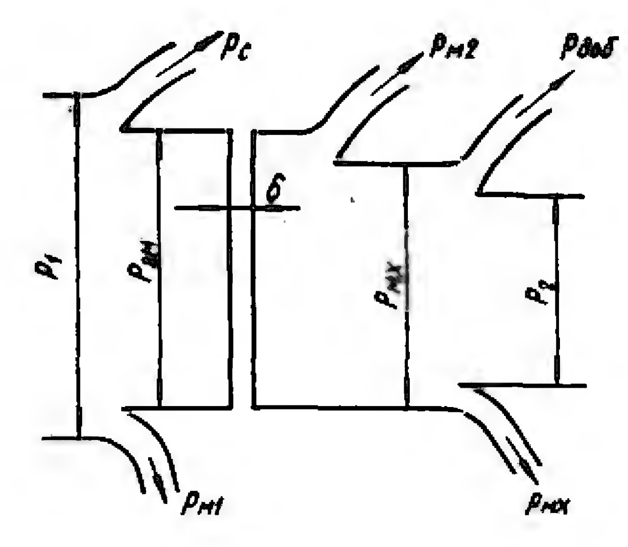


Рис. 11.6. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

К статору трехфазного асинхронного двигателя подводится мощность

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1. \quad (11.13)$$

Протекающий по статору ток создает электрические потери $p_{м1}$, а в стали статора возникают потери от гистерезиса и вихревых токов $p_с$. Оставшаяся мощность $P_{эм}$ передается на ротор через воздушный зазор δ электромагнитным путем и поэтому называется *электромагнитной*. Вращающийся магнитный поток наводит в роторе ЭДС, а протекающий ток создает электрические потери $p_{м2}$. Ротор начинает вращаться, развивая механическую мощность $P_{мх}$. При вращении ротора возникают механические ($p_{мх}$) и добавочные ($p_{доб}$) потери, вычтя которые из $P_{мх}$, получим полезную мощность на валу двигателя P_2.

Исходя из условия равновесия моментов (7.6), с помощью энергетической диаграммы можно получить ряд важных соотношений.

В общем случае, когда асинхронный двигатель имеет число пар полюсов $p > 1$, так называемая *механическая угловая скорость* магнитного потока

$$\Omega_1 = 2\pi n_1 = 2\pi f_1/p = \omega_1/p, \quad (11.14)$$

а ротора [по аналогии с выражением (11.3)]

$$\Omega = \Omega_1 (1 - s). \quad (11.15)$$

Электромагнитная и механическая мощности связаны с вращающим моментом двигателя соотношениями (см. п.7.1)

$$P_{эм} = \Omega_1 M; \quad (11.16)$$

$$P_{мх} = \Omega M. \quad (11.17)$$

Подставив (11.15) в (11.17), с учетом (11.16) получим

$$P_{мх} = \Omega_1 M (1 - s) = P_{эм} (1 - s). \quad (11.18)$$

Из энергетической диаграммы следует, что

$$P_{мх} = P_{эм} - p_{м2}. \quad (11.19)$$

Приравняв правые части уравнений (11.18) и (11.19), найдем

$$P_{эм} (1 - s) = P_{эм} - p_{м2},$$

откуда

$$p_{м2} = P_{эм}s. \qquad (11.20)$$

Таким образом, *электрические потери в роторе пропорциональны скольжению.*

11.6. Вращающий момент асинхронного двигателя

Общее выражение момента. Электрические потери в роторе с учетом его приведения

$$p_{м2} = m_2E_{2s}I_2\cos\varphi_2 = m_2E_2sI_2\cos\varphi_2 = m_1E_2'sI_2'\cos\varphi_2, \qquad (11.21)$$

где m_1 и m_2 — число фаз статора и ротора соответственно, а φ_2 — угол сдвига между ЭДС и током ротора.

Сопоставив выражения (11.20) и (11.21), увидим, что электромагнитная мощность

$$P_{эм} = m_2E_2I_2\cos\varphi_2. \qquad (11.22)$$

Тогда, согласно (11.16), вращающий момент с учетом (11.6)

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{m_2E_2I_2\cos\varphi_2}{2\pi f_1/p} =$$

$$= \frac{m_2 4{,}44k_{об_2}w_2f_1\Phi I_2\cos\varphi_2}{2\pi f_1/p} = c_M\Phi I_2\cos\varphi_2, \qquad (11.23)$$

где $c_M = 2{,}22m_2pk_{об_2}w_2/\pi$ — постоянная.

Сравнивая полученное выражение с (3.29), видим их идентичность. *Вращающий момент асинхронного двигателя зависит не от полного тока в роторе, а лишь от его активной составляющей* $I_2\cos\varphi_2$. Этот вывод, как и формула (11.23), справедлив для электрических машин всех типов.

Момент и потери в цепи ротора. С учетом выражения (11.20) формулу (11.23) можно записать так:

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{p_{м2}/s}{\Omega_1}, \qquad (11.24)$$

т. е. вращающий момент асинхронного двигателя зависит от электрических потерь в цепи ротора. Значит, двигатель, обмотка ротора которого имеет большее сопротивление, развивает при прочих равных условиях больший момент. В то же время повышение электрических потерь делает работу двигателя менее экономичной.

Зависимость момента от напряжения. Электрические потери в роторе $p_{м2} = m_2I_2^2r_2 = m_1I_2'^2r_2'$. Подставив сюда

значение тока из (11.12), получим

$$p_{м2} = m_1 r_2' \left(\frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \right)^2. \qquad (11.25)$$

Окончательное уравнение вращающегося момента получается подстановкой (11.14) и (11.25) в (11.24):

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]}. \qquad (11.26)$$

Формула (11.26) позволяет сделать важный практический вывод: *вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, приложенного к статору*. Это свойство асинхронного двигателя является его существенным недостатком. Например, если вспомогательный двигатель электровоза развивает момент M при напряжении в контактной сети 10 кВ, то при допускаемом уменьшении напряжения до 7 кВ вращающий момент станет равен $(7/10)^2 M = 0{,}49\ M$, что может отрицательно сказаться на работе приводного механизма и самого двигателя. Поэтому вспомогательные асинхронные двигатели электровозов выбирают со значительным запасом по мощности по сравнению с двигателями постоянного тока, приводящими аналогичные механизмы.

Зависимость момента от скольжения. Из выражения (11.26) следует, что при $s > 0$ также $M > 0$, т. е. имеет место двигательный режим или режим электромагнитного тормоза; при $s < 0$ также $M < 0$ (генераторный режим). Кроме того, $M = 0$ при $s = 0$ или $s = \pm\infty$; следовательно, между этими значениями скольжения находятся экстремумы (максимум и минимум) момента.

11.7. Механическая характеристика асинхронной машины

Эта характеристика, представляющая собой графическую зависимость $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$, может быть построена по уравнению (11.26), если задаваться различными (положительными или отрицательными) значениями скольжений (рис. 11.7, *а*). Из рисунка видно, что момент достигает максимума при некотором скольжении $s_{кр} \approx \approx 0{,}15 \div 0{,}3$, называемом *критическим*. Форма кривой $M = f(s)$ указывает на то, что асинхронный двигатель может устойчиво работать только в диапазоне скольжений от $s = 0$ до $s = s_{кр}$, когда момент увеличивается со скольжением от $M = 0$ до $M = M_{max}$. После превышения крити-

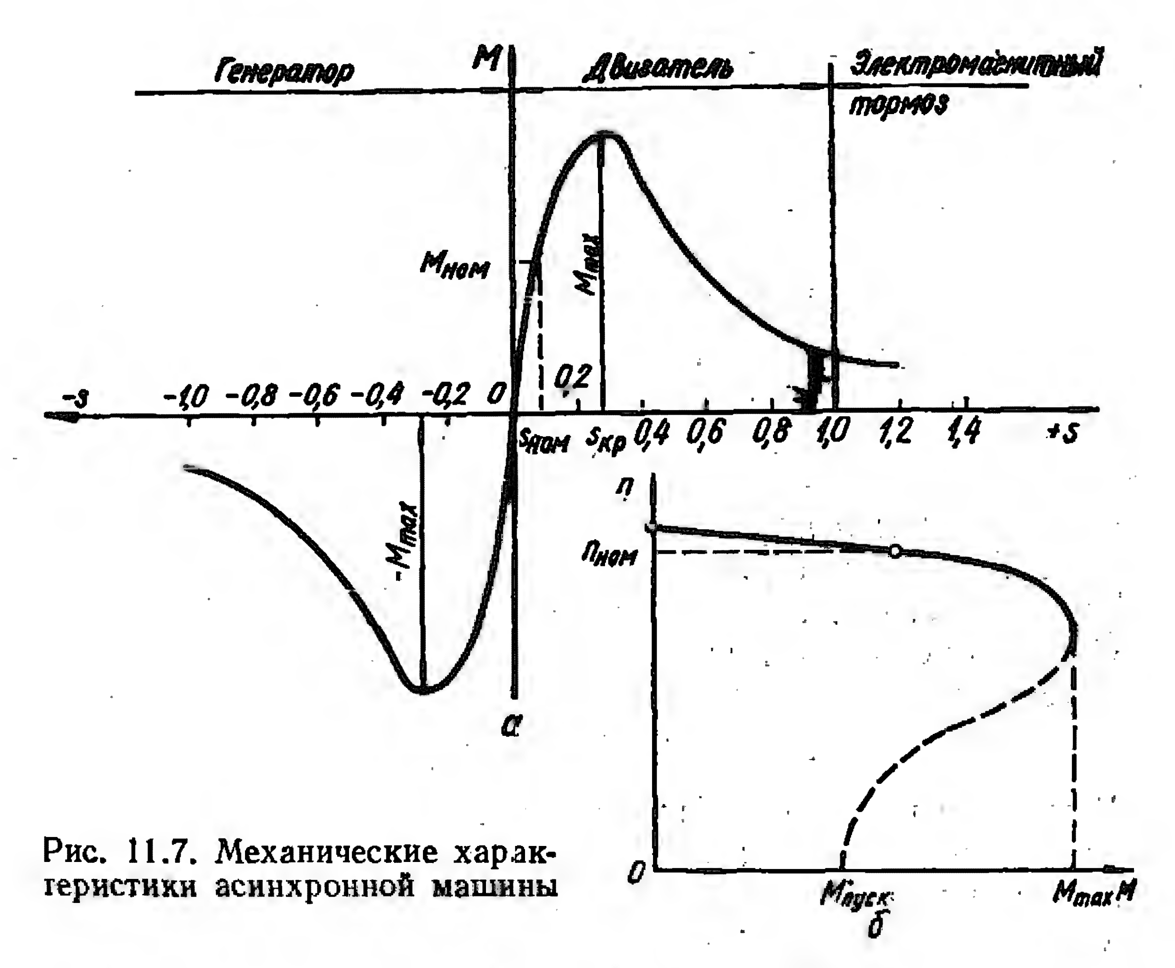


Рис. 11.7. Механические характеристики асинхронной машины

ческого скольжения момент уменьшается и двигатель неизбежно должен остановиться. Таким образом, асинхронный двигатель имеет предел по перегрузке, определяемый максимумом вращающего момента.

Следует помнить, что в диапазоне больших скольжений ($s > s_{кр}$), согласно уравнениям (11.5) и (11.20), резко увеличиваются потери в стали и обмотке ротора по сравнению с номинальным режимом. Выделяющаяся при этом теплота может привести к порче двигателя, вплоть до выплавления «беличьей клетки» ротора.

Максимальное значение момента (критическое скольжение) можно определить, взяв производную от момента (11.26) по скольжению и приравняв ее нулю, т. е. $dM/ds = 0$. В результате этой обычной математической операции получим

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \qquad (11.27, а)$$

В обычных электрических машинах $r_1 \ll (x_1 + x_2')$; поэтому, пренебрегая величиной r_1, получаем

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} = \pm \frac{r_2'}{x_к}, \qquad (11.27, б)$$

где $x_к = x_1 + x_2'$ — один из параметров короткого замыкания по (8.28, в).

Значение максимального момента определим по (11.26), подставляя значение $s_{кр}$ из (11.27, *б*) и принимая $r_1 = 0$:

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1U_1^2}{2\omega_1 x_к} = \pm \frac{pm_1U_1^2}{4\pi f_1 x_к}, \qquad (11.28)$$

где знак «+» относится к двигательному, а «—» — к генераторному режиму.

Из уравнения (11.28) видно, что *максимальный момент зависит лишь от конструктивных параметров двигателя (величины $x_к$) и в процессе эксплуатации изменен быть не может.* Активное сопротивление цепи ротора по (11.27) определяет только значение $s_{кр}$ при M_{max}.

Отношение максимального момента к номинальному называется *коэффициентом перегрузочной способности*; обычно

$$k_м = M_{max}/M_{ном} = 1{,}8 \div 2{,}5.$$

В момент пуска $s = 1$; поэтому значение $M_{пуск}$ можно получить, подставив это значение скольжения в (11.26).

Механическая характеристика асинхронного двигателя в общепринятой функции $n = f(M)$ построена на рис. 11.7, *б* из зависимости $M = f(s)$, так как n и s связаны между собой выражением (11.3). Сплошной линией изображена рабочая часть характеристики.

Как видно, при увеличении нагрузки на валу частота вращения двигателя несколько падает. По своему виду рабочая часть характеристики аналогична механической характеристике двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Если нагрузка на валу увеличится до M_{max}, то двигатель может перейти на неустойчивую (штриховую) часть характеристики, где одновременно начнут уменьшаться и развиваемый двигателем вращающий момент, и частота вращения вплоть до останова двигателя.

11.8. Пуск асинхронных двигателей в ход

Пуск двигателей в ход должен быть простым, при возможно большем пусковом моменте и наименьшем пусковом токе. Практически используют три следующих способа:

1) непосредственное подключение статора к сети (прямой пуск);

2) понижение напряжения, подводимого к статору при пуске;

3) включение в цепь ротора пускового резистора.

Прямой пуск применяют для двигателей с короткозамкнутым ротором. Двигатель автоматически разгоняется по механической характеристике (см. рис. 11.7) от точки, соответствующей $M_{пуск}$, до точки на рабочей части характеристики, в которой устанавливается равновесие моментов [см. выражение (7.6)].

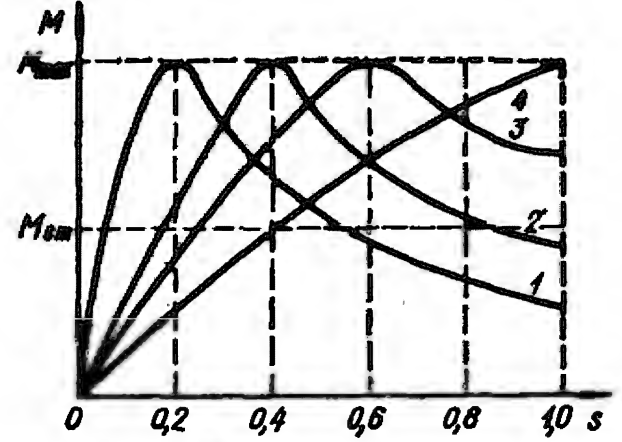


Рис. 11.8. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных сопротивлениях цепи ротора

Отношение моментов $M_{пуск}/M_{ном} = k_п$ называют *кратностью начального пускового момента*. Для двигателей мощностью до 100 кВт $k_п = 1 \div 2$; мощностью более 100 кВт $k_п = 0{,}7 \div 1$.

Недостатком прямого пуска является сравнительно малое значение $k_п$ и чрезвычайно большой бросок пускового тока, в 5—7 раз превышающий $I_{1\,ном}$.

Пуск при пониженном напряжении применяют с целью уменьшения броска пускового тока. Для этого на период пуска в цепь статора включают реактор, на котором падает часть напряжения, пропорциональная пусковому току, либо снижают напряжение с помощью автотрансформатора.

Применяют также переключение обмотки статора при пуске с рабочей схемы «треугольник» (Δ) на пусковую схему «звезда» (Y). При включении статора по схеме Y напряжение, подаваемое на фазы обмотки, уменьшается в $\sqrt{3}$ раза, что обусловливает такое же уменьшение фазных токов, а линейных — в три раза. Последнее очень важно для системы электроснабжения. Следует помнить, что согласно (11.26), снижение фазного напряжения в $\sqrt{3}$ уменьшает пусковой момент в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза.

Включение в цепь ротора пускового резистора возможно при пуске двигателей с фазным ротором (см. рис. 11.1). Из выражения (11.27, б) видно, что при увеличении активного сопротивления цепи ротора растет значение $s_{кр}$, т. е. максимум момента, оставаясь неизменным по значению наступает при бо́льших скольжениях. Подобрав такое значение сопротивления пускового резистора $r_р$, чтобы, согласно (11.27, *б*), $r_р + r_2' \approx x_к$, можно получить $s_{кр} = 1$, т. е. двигатель при пуске разовьет максимальный момент.

Увеличение сопротивления цепи ротора, как видно из выражения (11.12), уменьшит полный пусковой ток.

Физическое объяснение этому, казалось бы, парадоксальному явлению (ток уменьшается, а момент возрастает) следует из выражения (11.23). Резистор хоть и уменьшает полный ток, но увеличивает его активную составляющую, поскольку увеличивается активная составляющая полного сопротивления Z_2 цепи ротора; действительно, $Z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2}$, а с резистором $Z_{2р} = \sqrt{(r_2 + r_р)^2 + x_2^2}$.

Механические характеристики двигателя при различных сопротивлениях ротора изображены на рис. 11.8. Здесь характеристика с бóльшим порядковым номером соответствует большему сопротивлению цепи ротора. Для кривой *4* $s_{кр} = 1$ и $M_{пуск} = M_{max}$. Выводя ступенями пусковой реостат, переходят на характеристики *3*, *2*, пока не выйдут на естественную характеристику *1*. После этого щетки поднимают с колец, а обмотка ротора закорачивается.

11.9. Короткозамкнутые асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом

Необходимость обеспечения высоких пусковых моментов без применения пусковых резисторов привела к созданию двигателей с короткозамкнутым ротором, в которых использовано явление вытеснения тока в стержнях при пуске, когда при $s = 1$, согласно (11.5), $f_2 = f_1$.

Как известно, при вытеснении тока в верхнюю часть проводника происходит уменьшение его используемого сечения, что эквивалентно повышению активного сопротивления стержня; кроме того, вытеснение тока приводит к уменьшению индуктивного сопротивления, так как уменьшается общая проводимость пазового магнитного потока

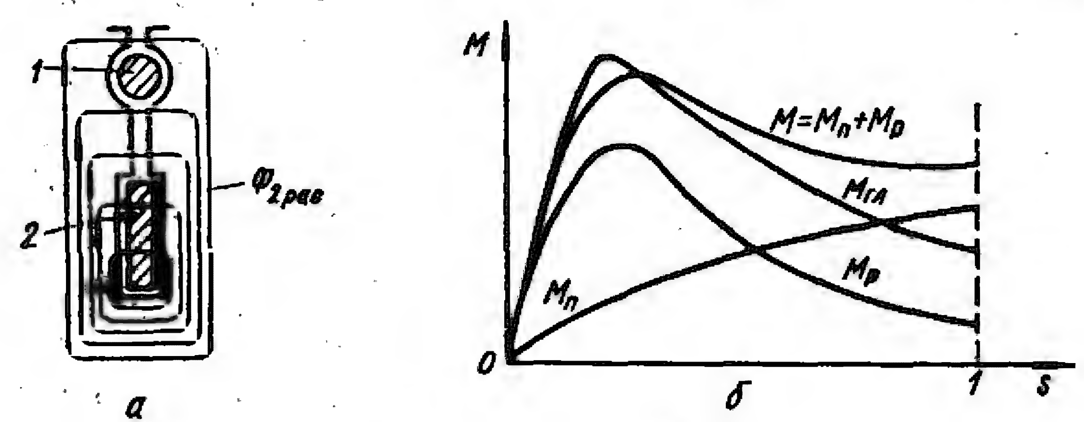


Рис. 11.9. Паз двухклеточного ротора (*а*) и механические характеристики пусковой и рабочей клеток (*б*)

рассеяния. Все это создает, как показано в п. 11.8, условия для получения высокого пускового момента.

Этими свойствами обладают двигатели с двухклеточным и глубокопазным роторами.

Двигатель с двойной «беличьей клеткой». Ротор имеет две короткозамкнутых обмотки (рис. 11.9, *а*). Наружная клетка *1* является пусковой; ее стержни имеют малое поперечное сечение и изготавливаются из марганцовистой латуни или бронзы, поэтому активное сопротивление этой клетки $r_{2п}$ достаточно велико. Внутренняя клетка *2* является основной (рабочей); она изготавливается из медных стержней большего поперечного сечения, поэтому ее активное сопротивление $r_{2р}$ сравнительно мало. В некоторых случаях обе клетки объединяют и выполняют литыми из алюминия.

Индуктивные сопротивления клеток определяются значением потока рассеяния $\Phi_{2рас}$, сцепленного с их стержнями. Поскольку пусковая клетка расположена ближе к поверхности ротора, сцепленный с нею поток рассеяния невелик и, следовательно, ее индуктивное сопротивление $x_{2п}$ мало. У рабочей же клетки потокосцепление рассеяния велико, значит, она обладает большим $x_{2р}$. Соотношение между $x_{2п}$ и $x_{2р}$, а также увеличение последнего обеспечиваются соответствующим выбором ширин и высот шлица в пазу над верхней клеткой и щели между стержнями.

Обе клетки в электрическом отношении включены параллельно, поэтому токи между ними распределяются обратно пропорционально их полным сопротивлениям:

$$I_{2п}/I_{2р} = Z_{2р}/Z_{2п} = \sqrt{r_{2р}^2 + x_{2р}^2}/\sqrt{r_{2п}^2 + x_{2п}^2}.$$

При пуске ($s = 1$) индуктивные сопротивления по сравнению с активными чрезвычайно велики; поэтому $I_{2п}/I_{2р} \approx$ $\approx x_{2р}/x_{2п}$, т. е. ток ротора в основном проходит по верхней пусковой клетке, так как $x_{2п} < x_{2р}$. Но у этой же клетки велико $r_{2п}$, что приводит к появлению большого пускового момента.

По мере разгона ротора уменьшаются скольжение s и частота $f_2 = f_1 s$. Вместе со скольжением и частотой, как это следует из (11.8), уменьшается индуктивное сопротивление $x_{2р}$, и ток постепенно переходит из пусковой клетки в рабочую.

По окончании пуска, когда скольжение очень мало, роль индуктивных сопротивлений в токораспределении становится незначительной; поэтому можно считать, что $I_{2п}/I_{2р} \approx$

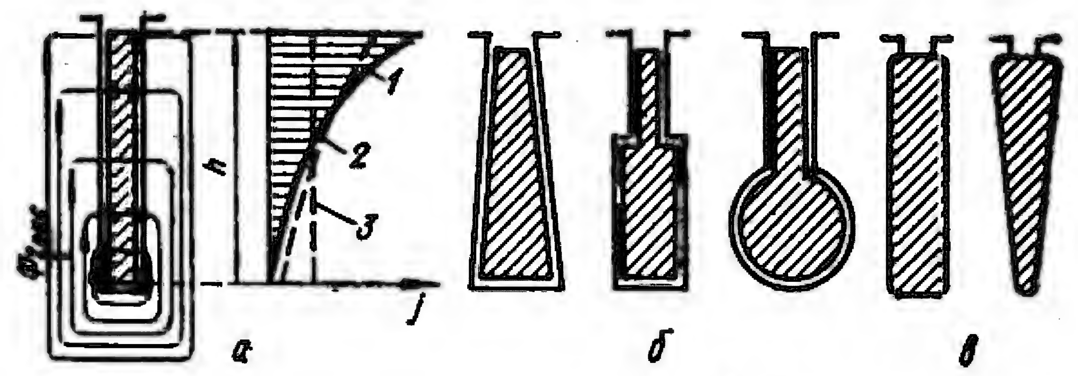


Рис. 11.10. Распределение плотности тока по высоте стержня глубокопазного ротора (*а*) и различные формы сечений стержней (*б*, *в*)

$\approx r_{2р}/r_{2п}$. Но так как $r_{2п} > r_{2р}$, то ток ротора в основном проходит по нижней рабочей клетке.

Итак, в двухклеточном роторе ток в начальный момент пуска вытесняется в верхнюю (пусковую) клетку, создающую большой пусковой момент; по мере разгона ток постепенно проникает в нижнюю (рабочую) клетку, а по окончании пуска практически полностью протекает по ней.

На рис. 11.9, *б* показаны механические характеристики пусковой и рабочей клеток, а также результирующая кривая, представляющая собой сумму двух предыдущих ($M = M_п + M_р$).

У двухклеточных двигателей большой мощности кратность начального пускового момента $k_п = 1{,}7 \div 2$ при существенно меньшем, чем у обычных двигателей, броске пускового тока: $I_{1пуск}/I_{1ном} = 4 \div 5$ (ср. с пусковыми параметрами обычных двигателей в п. 11.8).

Глубокопазный двигатель. Можно показать, что эффект вытеснения тока в верхнюю часть проводника, когда $s = 1$ и $f_2 = f_1 = 50$ Гц, начинает проявляться у медного проводника при его высоте $h > 12$ мм, а у алюминиевого — при $h > 16$ мм. Например, активное сопротивление медного проводника при $h = 50$ мм в 5 раз больше, а индуктивное — в 3,33 раза меньше в начальный момент пуска, чем в рабочем режиме при $s_{ном} = 0{,}01 \div 0{,}03$. Поэтому «беличью клетку» глубокопазных двигателей выполняют из узких и высоких (30—60 мм) стержней.

Распределение плотности тока j по высоте стержня h в момент пуска показано на рис. 11.10, *а* кривой *1*. Можно представить себе, что при пуске работает только верхняя часть стержня, его активное сопротивление увеличивается, а индуктивное — уменьшается, и создаются условия для возникновения большого пускового момента.

При разгоне с уменьшением частоты f_2 ток все более равномерно распределяется по высоте стержня (кривая *2* на

рис. 11.10, *а*). Происходят как бы плавное увеличение рабочего сечения проводника и уменьшение его активного сопротивления.

В номинальном режиме явления вытеснения тока нет, активное сопротивление стержня становится минимальным, плотность тока равномерно распределяется по высоте проводника (линия *3* на рис. 11.10, *а*).

На рис. 11.9, *б* кривая $M_{гл}$ представляет механическую характеристику глубокопазного двигателя. Она занимает промежуточное положение между характеристиками обычного и двухклеточного двигателей.

Существуют разновидности глубокопазных двигателей с трапециедальной, двухступенчатой и колбообразной формами стержней (рис. 11.10, *б*). Эти роторы дешевле двухклеточных, поэтому они получили большее распространение.

С целью усиления эффекта вытеснения тока при пуске в современных короткозамкнутых двигателях мощностью до 100 кВт с алюминиевой заливкой роторов пазам последних придают специально сильно вытянутую в радиальном направлении форму (рис. 11.10, *в*).

11.10. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Подставив в выражение (11.3) значения синхронной частоты вращения из (11.1) и скольжения из (11.20), получим формулу

$$n = \frac{f_1}{p}\left(1 - \frac{p_{м2}}{P_{эм}}\right), \tag{11.29}$$

из которой следуют три принципиально возможных способа регулирования n: изменением частоты f_1 питающего напряжения, числа пар полюсов p и электрических потерь $p_{м2}$ в цепи ротора (включением резистора в цепь ротора).

Частотное регулирование требует применения специальных источников питания с изменяемой частотой. Быстрое развитие полупроводниковой техники делает этот способ регулирования все более распространенным. Особо важное значение такое регулирование имеет для тягового электропривода, так как плавное бесступенчатое регулирование частоты f_1 дает возможность так же плавно изменять частоту вращения двигателя n, а значит, и скорость движения экипажа.

Однако частотное регулирование сводится не только к изменению частоты f_1: одновременно требуется изменение

и значения питающего напряжения U_1. Законы его изменения могут быть разными в зависимости от свойств, которые хотят придать двигателю, а причины необходимости регулирования U_1 объясняются следующим.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_к = \omega_1 L_к = 2\pi f_1 L_к$, и формула (11.28) приобретает вид

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{8\pi^2 f_1^2 L_к} = \pm c_{MM} \frac{U_1^2}{f_1^2}, \qquad (11.30)$$

где $c_{MM} = pm_1/(8\pi^2 L_к)$ — постоянная.

Из (11.30) следует, что при изменении f_1 одновременно с частотой вращения изменяется величина M_{max}, т. е. коэффициент перегрузочной способности $k_м$. Например, при увеличении скорости движения электровоза в 1,41 раза во столько же увеличивается и частота f_1; тогда при неизменном значении U_1 максимальный момент уменьшится в $(1{,}41)^2 = 2$ раза, что может оказаться недопустимым по условиям устойчивой работы двигателя.

Изменение частоты f_1 при неизменном значении U_1 приводит к изменению в обратной пропорциональности магнитного потока Ф, что видно из формулы (10.2), поскольку $U_1 \approx E_1$. Это является недопустимым, так как увеличение потока вызовет сильное насыщение магнитной цепи и рост намагничивающего индуктивного тока, а уменьшение Ф приведет к недоиспользованию машины, снижению, как уже отмечено, ее перегрузочной способности.

Основной закон частотного регулирования выражен М. П. Костенко следующей формулой:

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \sqrt{\frac{M}{M_{ном}}}, \qquad (11.31)$$

где U_1, f_1 и M — текущие значения напряжения, частоты и вращающего момента.

Например, если при частотном регулировании необходимо иметь $M = M_{ном}$, то выражение (11.31) получает вид $U_1/f_1 = U_{1ном}/f_{1ном} = \text{const}$, т. е. при изменении частоты f_1 следует пропорционально изменять и напряжение U_1.

Формула (11.31) позволяет определить взаимозависимость U_1 и f_1 при любых требуемых условиях.

Регулирование изменением числа пар полюсов применяется в двигателях с короткозамкнутым ротором, так как при этом достаточно обойтись только переключением обмотки статора. Если на статоре уложить обмотку, допускающую

переключение числа пар полюсов в отношении 1 : 2, то получится двухскоростная машина.

Иногда на статоре укладывают две переключающиеся обмотки, и тогда получается четырехскоростная машина. Например, двигатель с двумя переключающимися обмотками на $p = 2$ и 4, $p = 3$ и 6 при $f_1 = 50$ Гц имеет синхронную частоту вращения 1500/1000/750/500 об/мин.

Многоскоростные двигатели больше по размерам, массе и стоимости по сравнению с двигателями нормального исполнения; регулирование частоты их вращения ограничено, как правило, четырьмя ступенями.

Регулирование включением резистора в цепь ротора возможно только в двигателях с фазным ротором. При увеличении сопротивления резистора повышаются потери $p_{м2}$ и, согласно (11.29), частота вращения n снижается. При заданном статическом моменте $M_{ст}$ происходит переход с характеристики *1* на характеристику *2*, *3* и т. д. с увеличением скольжения (см. рис. 11.8).

Этот способ позволяет изменять частоту вращения в широких пределах, однако он связан с большими потерями энергии в регулировочном резисторе.

11.11. Однофазные асинхронные двигатели

В целом ряде случаев (на транспорте, в бытовых условиях и т. п.) возникает необходимость питания машин переменного тока от однофазных сетей. Здесь находят применение однофазные двигатели, которые легко получить из трехфазных, отключив одну из фаз статора, а оставшиеся две соединив последовательно или параллельно. Очевидно, мощность однофазного двигателя при этом даже теоретически не может быть больше $^2/_3$ мощности трехфазного. В специальных однофазных двигателях обмоткой заполнят также не более $^2/_3$ пазов, поскольку при большем их заполнении обмоточный коэффициент (см. п. 10.1) получается малым, расход меди возрастает, а наводимая ЭДС, значит, и мощность практически не увеличиваются.

Однофазный ток в статоре создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить (см. п. 10.2) на два поля, вращающихся в разные стороны. При неподвижном роторе эти поля создают одинаковые по значению, но разные по знаку вращающие моменты M_I и M_{II}. Результирующий момент $M_{пуск} = M_I - M_{II} = 0$ и поэтому без специальных приспособлений двигатель с места не трогается.

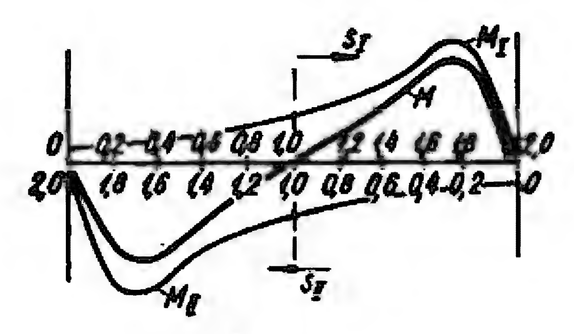


Рис. 11.11. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя

Если ротор привести во вращение в какую-либо сторону, то одно поле — прямое, вращающееся в ту же сторону, что и ротор,— будет действовать аналогично полю трехфазного двигателя $[f_{2I} = p(n_1 - n) = f_1 s]$. Второе — обратное поле — создаст режим электромагнитного тормоза, наводимая им ЭДС в роторе будет иметь частоту $f_{2II} = p(n_1 + n) = p(n_1 + n + n_1 - n_1) = p\ [2n_1 - (n_1 - n)] = pn_1[2 - (n_1 - n)/n_1] = f_1(2 - s)$, где $(2 - s)$ — скольжение ротора относительно обратно вращающегося поля.

При $0 < s < 1$ величина $(2 - s) > 1$ и $f_{2II} > f_1$. Например, при номинальном значении $s_{ном} = 0{,}02$ $f_{2I} = 1$ Гц, а $f_{2II} = 50\,(2 - 0{,}02) = 99$ Гц. Поэтому индуктивное сопротивление обмотки ротора току I'_{2II} очень велико $(x'_{2s} = 2\pi f_{2II} L_2)$, ток является практически чисто индуктивным и оказывает размагничивающее действие на обратно вращающееся магнитное поле. Очевидно, при этом сильно уменьшается обратный момент M_{II} и ротор вращается в направлении прямого момента M_I.

На рис. 11.11 изображены механические характеристики однофазного асинхронного двигателя, причем зависимость $M_{II} = f(s_{II})$ показана ниже оси абсцисс, так как момент M_{II} направлен против момента M_I. Результирующий момент $M = M_I - M_{II}$ совпадает с направлением вращения ротора.

Для получения начального пускового момента необходимо создать вращающееся магнитное поле. При использовании трехфазных двигателей с этой целью можно воспользоваться одной из схем, показанных на рис. 11.12.

Если представить себе эквивалентную магнитную ось

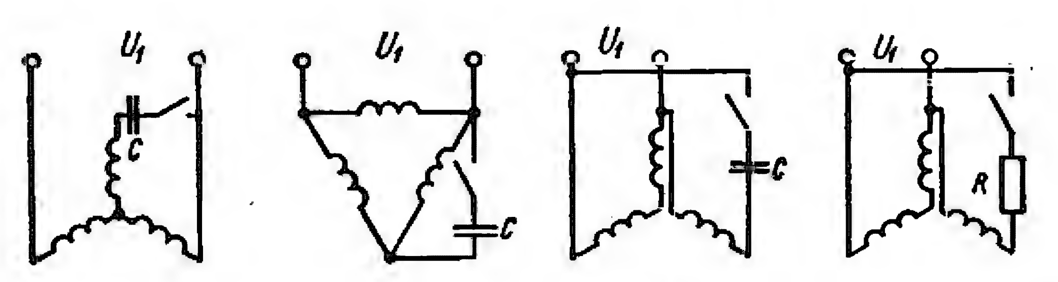


Рис. 11.12. Схемы включения трехфазных асинхронных двигателей для работы от однофазной сети

двух последовательно включенных по схеме Y фаз, то третья (свободная) фаза будет ей перпендикулярна; этим обеспечивается сдвиг магнитных осей в пространстве на угол 90° эл. Третья фаза играет роль пусковой обмотки. Включаемые в ее цепь конденсатор, резистор или индуктивность, создавая сдвиг во времени, обеспечивают появление вращающегося поля. Если даже это поле не является круговым, созданный момент дает возможность пустить в ход двигатель. Реверсирование такого двигателя осуществляется изменением подсоединения пускового элемента к сети. Соответствующим подбором емкости пускового конденсатора можно обеспечить сдвиг во времени на угол 90°, тогда поле будет круговым. В некоторых однофазных машинах пусковую обмотку наматывают проводом меньшего сечения, что повышает ее сопротивление и не представляет опасности в короткий период пуска. В таком случае нет необходимости в использовании специального резистора, тем более что сама пусковая обмотка обладает индуктивностью. После пуска двигателя пусковую обмотку отключают.

11.12. Конденсаторные (двухфазные) асинхронные двигатели

Это такие двигатели (рис. 11.13), на статоре которых под углом 90° эл. уложены две обмотки, занимающие одинаковое число пазов. Одну из обмоток (*A*) включают непосредственно в однофазную сеть, а другую (*B*) — в ту же сеть, но через конденсатор *C*, который остается постоянно включенным в течение всего периода работы, создавая фазовый сдвиг между токами $\dot{I}_A$ и $\dot{I}_B$; поэтому эти двигатели и называют *двухфазными*. Таким образом, если однофазный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующим полем, то конденсаторный — с вращающимся. Это приближает конденсаторные двигатели к трехфазным.

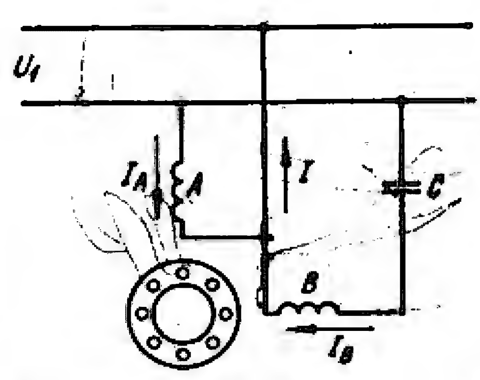


Рис. 11.13. Схема конденсаторного (двухфазного) асинхронного двигателя

Подбором емкости конденсатора *C* можно обеспечить получение кругового поля в одном нужном режиме работы, в том числе и при пуске; мощность конденсатора при этом должна быть равна полной мощности двигателя, т. е. достаточно

велика. В других режимах, отличных от расчетного, поле двигателя будет не круговым, а эллиптическим.

В некоторых случаях параллельно постоянно включенному конденсатору *C* на период пуска подключают пусковой конденсатор, что дает возможность обеспечить получение кругового поля при пуске и в нужном рабочем режиме.

Конденсаторные двигатели обладают более высокими энергетическими показателями, чем однофазные, их cos φ приближается к единице. К недостаткам этих двигателей следует отнести значительные размеры конденсаторов, что затрудняет их применение на транспорте.

11.13. Сельсины

В различных системах автоматики, в том числе и на современных локомотивах, широко используются индукционные машины синхронной связи — *сельсины* (от слов *self synchronizing* — самосинхронизирующиеся).

Сельсины служат для синхронного и синфазного поворота двух или нескольких осей, механически несвязанных между собой.

Сельсины имеют две обмотки: одно- или трехфазную обмотку возбуждения (*ОВ*) и выполненную по типу трехфазной обмотку синхронизации. В зависимости от назначения одна из обмоток расположена на статоре, а другая — на роторе. Сельсин, связанный с ведущей осью, называется *сельсин-датчиком* (*СД*), а сельсин, связанный с ведомой осью,— *сельсин-приемником* (*СП*). Схема включения однофазных сельсинов показана на рис. 11.14.

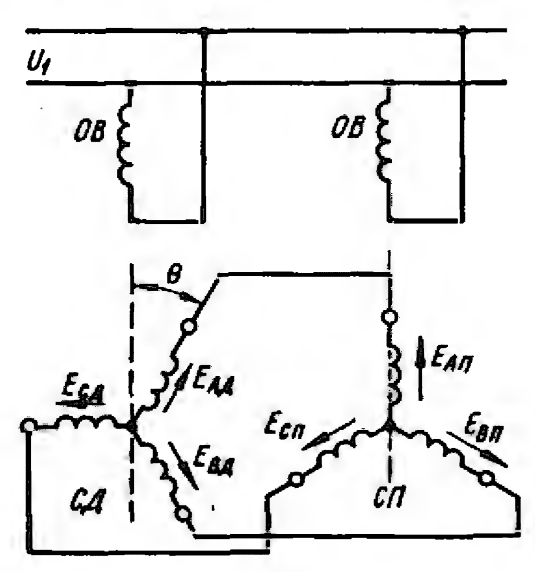


Рис. 11.14. Схема включения однофазных сельсинов

Пульсирующее поле возбуждения индуцирует ЭДС в обмотках синхронизации. Так как машины совершенно одинаковы, то если обмотки синхронизации расположены в пространстве идентично (угол рассогласования $\Theta = 0$), в них наводятся одинаковые и встречно направленные ЭДС, а тока в линиях синхронной связи нет.

Закрепим обмотку синхронизации *СП*, а обмотку син-

хронизации *СД* повернем по ходу часовой стрелки на угол Θ. Такое действие нарушит равенство наводимых ЭДС, в результате чего в обмотках и линиях синхронной связи появится ток.

Взаимодействие поля и тока создает вращающий момент, стремящийся повернуть *СД* против, а *СП* по ходу часовой стрелки.

Если растормозить *СП*, то он повернется по ходу часовой стрелки на угол Θ, после чего вновь наступит равновесие.

Таким образом, поворот или вращение *СД* вызывают совершенно одинаковое действие *СП*. Если на ось *СП* насадить стрелку, то она покажет угол поворота *СД*, который может быть расположен вдали от *СП* или в недоступном месте. Так, машинист электровоза, на пульте которого установлен *СП*, знает позицию главного контроллера, с валом которого соединен *СД*.

11.14. Асинхронные тахогенераторы

Как и тахогенераторы постоянного тока, они служат для преобразования частоты вращения в электрические сигналы. Для этой цели может быть использована двухфазная асинхронная машина (см. рис. 11.13), обмотка *B* которой без конденсатора отключена от сети и замкнута на нагрузку (вольтметр).

Если ротор неподвижен, то магнитный поток Φ_A обмотки *A* будет наводить в роторе трансформаторную ЭДС, под действием которой потекут токи, создающие магнитный поток Φ_d, направленный навстречу Φ_A. В обмотке *B* ЭДС наводиться не будет.

При движении ротора в нем, вследствие пересечения линий потока Φ_A, будет наводиться ЭДС вращения, направление которой определится по правилу правой руки. Частота этой ЭДС равна частоте в обмотке *A*, т. е. частоте сети f_1, а ее величина $E_A = c_{e_A} n\Phi_A$. Под действием ЭДС E_A течет ток I_A и создается магнитный поток Φ_q, направленный, согласно правилу буравчика, по оси обмотки *B*. Поскольку при ненасыщенной системе $\Phi_q \sim I_A$, а $I_A \sim E_A \sim n$, то $\Phi_q \sim n$. Поток Φ_q индуцирует в обмотке *B* ЭДС $E_B = 4{,}44 k_{об} w_B f_1 \Phi_q = c_{e_B} \Phi_q$, где c_{e_B} — постоянная. Таким образом, при принятых условиях $E_B \sim n$, т. е. характеристика тахогенератора $E_B = f(n)$ в идеале есть прямая линия, а практически напоминает характеристику тахогенератора постоянного тока (см. рис. 6.9).

Контрольные вопросы и задачи

1. Что называется скольжением асинхронной машины?
2. Какие существуют типы асинхронных машин, в чем их конструктивное различие?
3. Какие существуют режимы работы асинхронных машин, какие пределы изменения частот вращения и скольжений им соответствуют?
4. Трехфазный асинхронный двигатель получает питание от сети с $f_1 = 50$ Гц и ротор имеет при этом $n = 2850$ об/мин. Определить скольжение s, число пар полюсов p и частоту в роторе f_{2s}.
5. В чем аналогия асинхронного двигателя с трансформатором и в чем их различие? Напишите основные уравнения асинхронного двигателя и сравните с аналогичными уравнениями трансформатора.
6. Как и почему преобразовывают Т-образную схему замещения в Г-образную?
7. Как изменяются электрические потери в роторе при изменении скольжения? Как с ними связан вращающий момент?
8. Как зависит вращающий момент от питающего напряжения?
9. Чем определяется значение M_{max} асинхронного двигателя? Сравните вид механических характеристик двигателей постоянного тока и асинхронного, а также их способность к перегрузке.
10. Ротор асинхронного двигателя заторможен механическим тормозом. Можно ли оставить двигатель включенным в сеть?
11. Электрические потери в роторе в номинальном режиме работы при $s_{ном} = 0,05$ равны $p_{м2}$. Каково их значение в момент пуска двигателя?
12. Какие существуют способы пуска в ход асинхронных двигателей?
13. Какой принцип положен в основу создания двигателей с повышенным пусковым моментом?
14. Какая «беличья клетка» у двухклеточного двигателя является рабочей, а какая — пусковой? Каково соотношение их активных и индуктивных сопротивлений?
15. Почему у короткозамкнутых асинхронных двигателей применяют высокие стержни ротора?
16. Какие существуют способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей? Какой из них применим для тягового электропривода?
17. Почему при частотном регулировании требуется изменение значения питающего напряжения?
18. Каков принцип действия однофазных и двухфазных (конденсаторных) двигателей?
*19. Можно ли пустить в ход трехфазный асинхронный двигатель от однофазной сети? Что для этого нужно?
*20. Что такое сельсины, где и для чего они используются?
*21. В чем принцип работы асинхронного тахогенератора?

12.1. Принцип действия синхронных машин

Статор *1* синхронной машины (рис. 12.1) с уложенной на нем трехфазной обмоткой выполнен так, как описано в п. 10.1. На роторе *2* расположен *индуктор*, обмотка возбуждения которого питается постоянным током. С внешним источником постоянного тока обмотку возбуждения (ротора) соединяют посредством контактных колец и щеток.

При вращении ротора с частотой n созданный его обмоткой магнитный поток Φ_0 пересекает проводники обмотки статора, которая на рис. 12.1 показана сосредоточенной (вся фаза, например A — X, лежит в двух пазах, сдвинутых на угол 180° эл.) и индуцирует в них ЭДС, направление которой определяется правилом правой руки, а частота, согласно (В.3),

$$f_1 = pn. \qquad (12.1,а)$$

Если обмотку статора *(якоря)* подключить к нагрузке, то потечет ток $I_я$ и возникнет вращающееся магнитное поле (см. п. 10.2), частота вращения которого, согласно (10.5),

$$n_1 = f_1/p. \qquad (12.1,б)$$

Сравнив уравнения (12.1), видим, что $n = n_1$, т. е. ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора. Поэтому рассматриваемую машину называют *синхронной*. Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ в ней создается совместно обмотками индуктора (ротора) и якоря (статора), причем этот поток вращается в пространстве с частотой $n_1 = n$.

Можно представить, что ротор связан упругими магнитными силовыми линиями с вращающимся полем статора и они — ротор и поле — в установившемся режиме неподвижны относительно друг друга.

Если обмотку статора подключить к напряжению частотой f_1, то протекающий по обмотке ток создаст, так же как в асинхронной машине, вращающееся магнитное поле,

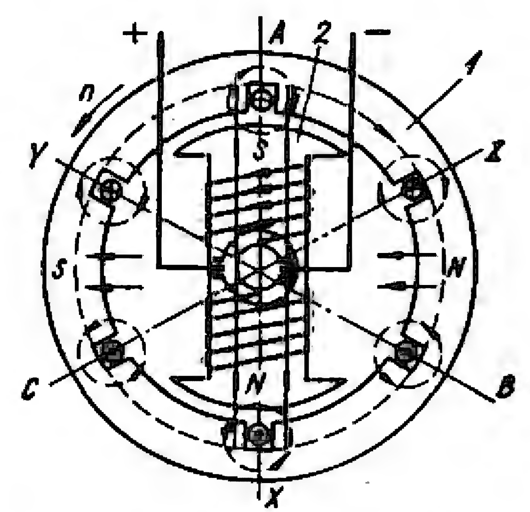


Рис. 12.1. Схема трехфазной синхронной машины

частота вращения которого определится по (11.1), или, что одно и то же, по (12.1, б).

Взаимодействие вращающегося поля статора с током возбуждения $I_в$ ротора приводит к появлению электромагнитного момента M, который при работе машины в двигательном режиме будет вращающим, а при работе в генераторном режиме — тормозным.

При разомкнутой обмотке статора (холостой ход) магнитный поток возбуждения создается роторной обмоткой постоянного тока, поэтому сам ротор неподвижен относительно магнитного поля и вращается синхронно вместе с ним независимо от механической нагрузки на валу (двигатель) или электрической нагрузки статора (генератор).

Назовем *продольной магнитной осью* линию, проходящую по оси полюсов, а *поперечной* — линию, проходящую через центр ротора под углом 90° эл. к продольной оси.

На рис. 12.1 показано, что магнитные силовые линии статора направлены по поперечной магнитной оси. Результирующее поле усилено на сбегающей части полюса: магнитные силовые линии ротора и статора совпадают по направлению; на набегающей части полюса магнитные силовые линии ротора и статора направлены встречно: результирующее поле ослаблено.

12.2. Конструктивные типы и устройство синхронных машин

Все синхронные машины разделяют по конструкции ротора на две группы: *явнополюсные* — с явно выраженными полюсами и *неявнополюсные* — с неявно выраженными полюсами.

Явнополюсный ротор (рис. 12.2, *а*) состоит из магнитопровода *1* и полюсных обмоток возбуждения *2*. Магнитопровод чаще всего выполняют в виде насаженного на вал машины полюсного колеса (роторной звезды), на ободе которого крепят шихтованные из листовой стали и стянутые шпильками полюсы.

Неявнополюсный ротор состоит из насаженного на вал стального кованого цилиндра *1* с выфрезерованными на его поверхности продольными пазами, в которые закладывают обмотку возбуждения *2*. Пазы размещают равномерно только на $^2/_3$ поверхности ротора, остальную часть ее занимают центральные зубцы (полюсы). Проводники обмотки надежно закрепляют в пазах немагнитными клиньями, а ее лобовые части — стальными бандажными кольцами.

Изготовление явнополюсных роторов значительно проще технологически и дешевле. Однако при высоких частотах вращения на ротор действуют большие центробежные силы и по условиям обеспечения механической прочности крепления полюсов и их обмоток применение явнополюсных роторов становится невозможным. Поэтому при $p = 1$ или 2 ($n = 3000$ или 1500 об/мин) синхронные машины выполняют, как правило, неявнополюсными. При $p \geqslant 3$ ($n \leqslant 1000$ об/мин) — машины явнополюсные.

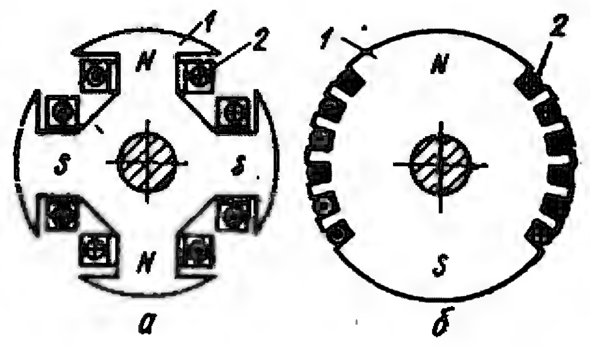


Рис. 12.2. Устройство роторов явнополюсной (*а*) и неявнополюсной (*б*) синхронных машин

В полюсных наконечниках роторов выштамповывают круглые пазы, в которых помещают латунные стержни, замыкаемые по торцам кольцами. Эта обмотка (типа «беличья клетка») является *пусковой* у двигателей и *успокоительной* — у генераторов. Назначение этой обмотки рассматривается ниже.

На валу ротора как явнополюсных, так и неявнополюсных синхронных машин устанавливают контактные кольца, к которым присоединяют выводы обмотки возбуждения. Кольца надежно изолируют от вала машины. С кольцами контактируют закрепленные в щеткодержателях щетки.

Явнополюсные синхронные генераторы применяются в качестве тяговых на тепловозах и карьерных электровозах с источниками автономного питания (дизель-генераторная установка).

Обмотка возбуждения ротора может получать питание от постороннего генератора постоянного тока (возбудителя), устанавливаемого на валу ротора синхронной машины, или питаться от собственной обмотки якоря (статора) через полупроводниковый выпрямитель. Регулирование тока возбуждения осуществляется автоматически специальными регуляторами. Мощность, необходимая для возбуждения, невелика и составляет 0,5—5 % мощности синхронной машины.

12.3. Реакция якоря синхронного генератора

Приведем во вращение возбужденный ротор, оставив статорную обмотку разомкнутой (холостой ход). Пока ее ток $I_я = 0$, в генераторе существует лишь МДС индуктора,

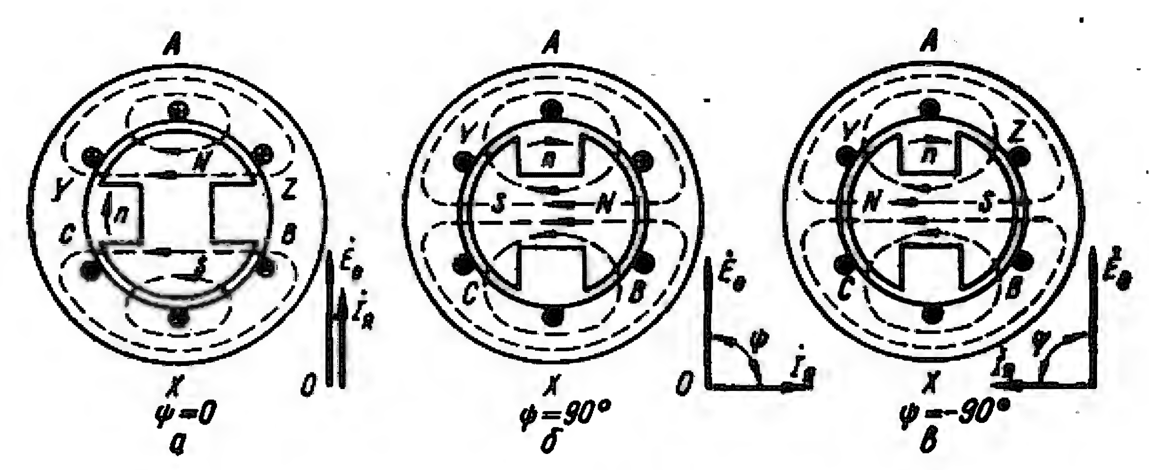


Рис. 12.3. Поперечная (*а*), продольно-размагничивающая (*б*) и продольно-намагничивающая (*в*) реакции якоря синхронной машины

создающая основной магнитный поток Φ_0. Этот поток наводит в якоре ЭДС E_0, определяемую уравнением (10.2).

Если к статору подключить нагрузку, то потечет ток $I_я$; в результате взаимодействия МДС якоря и индуктора возникает результирующее магнитное поле (поток $\Phi_{рез}$). Это результирующее поле отличается от основного (при холостом ходе) как по величине, так и по форме. Поэтому все параметры, прямо или косвенно зависящие от магнитного поля (например, наводимая в статоре ЭДС), тоже претерпевают изменение. Воздействие поля якоря (статора) на поле полюсов, как и у машин постоянного тока, называется *реакцией якоря*.

Рассмотрим действие реакции якоря на примере трехфазного двухполюсного генератора. Получаемые результаты можно распространить и на двигательный режим работы машины. Для простоты на рис. 12.3 изобразим каждую фазу обмотки статора в виде одного витка ($A — X$, $B — Y$, $C — Z$). Буквами N и S обозначим полярность полюсов ротора; магнитные силовые линии выходят из «северного» полюса и на рисунке не показаны.

При *активной* нагрузке синхронного генератора его ток и ЭДС совпадают по фазе, т. е. угол между ними $\psi = 0$. Следовательно, в момент наибольшего тока в фазе A будет наводиться и наибольшая ЭДС. А для этого ротор должен располагаться так, чтобы ось полюсов совпадала с плоскостью витка, изображающего фазу A (рис. 12.3, *а*).

Направления токов в фазах A, B и C легко определить по правилу правой руки, и они на рис. 12.3, *а* указаны крестиками и точками. При таких направлениях токов в фазах магнитные линии поля якоря (поток $\Phi_я$) направлены вдоль поперечной магнитной оси. А так как ротор и поле якоря

вращаются синхронно, такая ориентация потока сохраняется всегда.

Значит, если нагрузка активная и угол $\psi = 0$, то реакция якоря будет *поперечной*. Такая реакция якоря, подмагничивая один край полюса и размагничивая другой, искажает результирующее магнитное поле в воздушном зазоре машины.

При *чисто индуктивной* нагрузке ток отстает от ЭДС на угол $\psi = 90°$ и максимум тока в фазе *A* наступает на четверть периода позднее, когда ротор повернется на 90° по ходу часовой стрелки (рис. 12.3, *б*). А токи в фазах статора при этом сохранят те же значения, что и в предыдущем случае (см. рис. 12.1, *а*); поэтому магнитное поле якоря сохранит свое положение в пространстве. Как видно из рис. 12.3, *б*, поле якоря направлено теперь вдоль продольной оси полюсов навстречу основному магнитному потоку. Таким образом, при индуктивной нагрузке, когда $\psi = 90°$, имеет место *продольно-размагничивающая* реакция якоря, ослабляющая поток полюсов.

При *чисто емкостной* нагрузке ток опережает ЭДС на угол $\psi = -90°$, а максимум тока в фазе *A* наступает по сравнению с чисто активной нагрузкой на четверть периода раньше, когда ротор еще не дошел на 90° до положения, показанного на рис. 12.3, *а*. Токи же в фазах по-прежнему сохраняют свое значение, поэтому магнитное поле якоря занимает прежнее положение в пространстве. Как видно из рис. 12.3, *в*, при опережающем токе, когда угол $\psi = -90°$, поле якоря тоже направлено вдоль продольной оси полюсов, но его направление совпадает с направлением основного магнитного потока. Следовательно, при емкостной нагрузке имеет место *продольно-намагничивающая* реакция якоря, усиливающая поток полюсов.

В *общем случае* ток сдвинут по фазе относительно ЭДС на некоторый угол ψ, находящийся в пределах от $+90°$ до $-90°$. Очевидно, в этом случае вектор тока $\dot{I}_я$ можно разложить на две составляющие, одна из которых будет совпадать по фазе с вектором $\dot{E}_0$, а другая — находиться с ним в квадратуре. Таким образом, при смешанной нагрузке одновременно будут иметь место и поперечная, и продольная реакции якоря.

12.4. ЭДС синхронного генератора

Существенным признаком, отличающим неявно- и явнополюсную синхронную машины, является различное магнитное сопротивление для потока якоря, действующего по продольной (d — d) и поперечной (q — q) магнитным осям. Такое различие объясняется размером воздушного зазора: равномерного по всей окружности у неявнополюсной машины и резко увеличивающегося у явнополюсной за полюсным башмаком в зоне межполюсного пространства (см. рис. 12.1).

Это обстоятельство заставляет у явнополюсной машины условно разделять результирующий магнитный поток якоря $Ф_я$ на составляющие по осям d — d и q — q, считая, что действующие по ним потоки, соответственно $Ф_{яq}$ и $Ф_{яq}$, наводят «собственные» ЭДС $E_{яd}$ и $E_{яq}$.

Как и в трансформаторах (см. п. 8.4), существует поток рассеяния $Ф_{рас}$, наводящий ЭДС $E_{рас}$.

Таким образом, полная ЭДС нагруженного неявнополюсного генератора

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_я + \dot{E}_{рас}, \qquad (12.2)$$

где ЭДС $E_я$ пропорциональна потоку $Ф_я$, т. е. току $I_я$. На основании этого ЭДС $E_я$ можно рассматривать как ЭДС самоиндукции, индуцированную в обмотке якоря, и представить в виде $\dot{E}_я = -j\dot{I}_я x_я$, где $x_я$ — индуктивное сопротивление, обусловленное потоком реакции якоря. Аналогично ЭДС рассеяния $\dot{E}_{рас} = -j\dot{I}_я x_{рас}$, где $x_{рас}$ — индуктивное сопротивление, обусловленное потоком рассеяния.

Следовательно, уравнение (12.2) получает вид

$$\dot{E} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_я x_я - j\dot{I}_я x_{рас} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_я x_с, \qquad (12.3)$$

где $x_с = x_я + x_{рас}$ — синхронное индуктивное сопротивление.

Согласно второму закону Кирхгофа напряжение неявнополюсного генератора $\dot{U} = \dot{E} - \dot{I}_я r_я$, где $r_я$ — сопротивление обмотки статора. Величина $r_я$ обычно очень мала, поэтому можно принять $\dot{I}_я r_я = 0$; тогда

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_я x_с. \qquad (12.4)$$

У нагруженного явнополюсного генератора ЭДС

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{яd} + \dot{E}_{яq} + \dot{E}_{рас}, \qquad (12.5)$$

а напряжение

$$\dot{U} = \dot{E} - \dot{I}_я r_я = \dot{E}_0 + \dot{E}_{яd} + \dot{E}_{яq} + \dot{E}_{рас} - \dot{I}_я r_я. \quad (12.6)$$

Это уравнение можно преобразить, введя, аналогично предыдущему, понятие об индуктивных сопротивлениях по продольной ($x_{яd}$) и поперечной ($x_{яq}$) осям и приняв $\dot{I}_я r_я = 0$.

12.5. Характеристики и изменение напряжения синхронного генератора

Внешние характеристики синхронного генератора представляют зависимость $U = f(I_я)$ при неизменных токе $I_в$, $\cos\varphi$ и частоте вращения. Построим их для неявнополюсного генератора с помощью векторных диаграмм согласно уравнению (12.4).

Выбором значения тока возбуждения добъемся положения, при котором номинальному току $I_{я.ном}$ соответствует номинальное напряжение $U_{ном}$. Снижая ток нагрузки до нуля, получаем напряжение при холостом ходе $U_0 = E_0$. Построив векторные диаграммы для различных характеров нагрузки, увидим, как различаются соответствующие им значения U_0.

При активной нагрузке (рис. 12.4, *а*) векторы тока и напряжения совпадают по фазе ($\varphi = 0$); под углом 90° проведен вектор $j\dot{I}_я x_c$, а вектор $\dot{E}_0$ есть гипотенуза прямоугольного треугольника, т. е. $E_0 > U$, или $U_0 = E_0 > U_{ном}$.

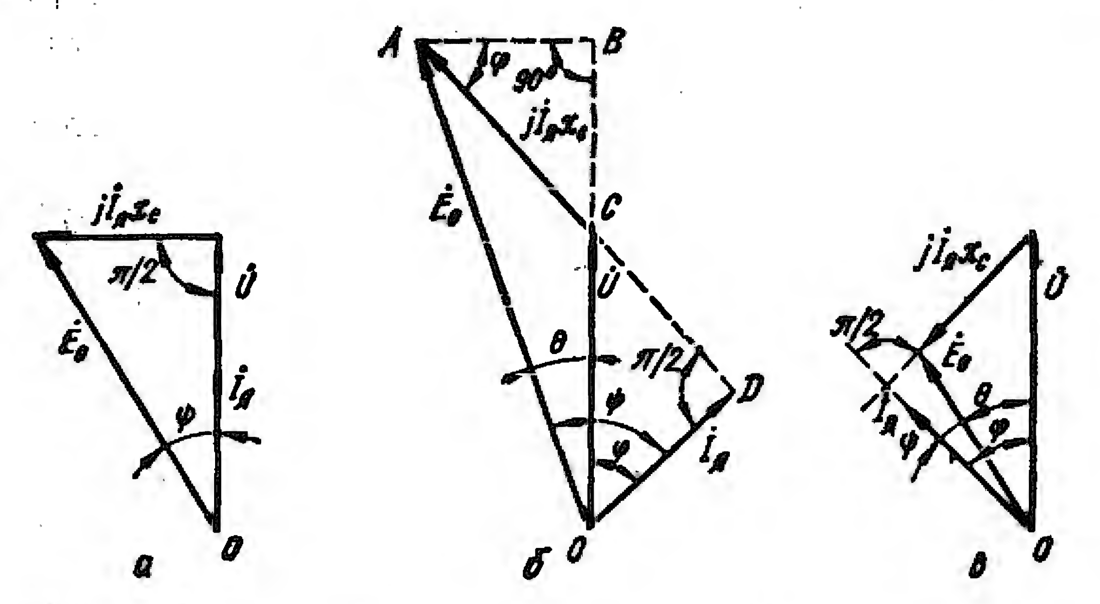


Рис. 12.4. Векторные диаграммы неявнополюсного синхронного генератора

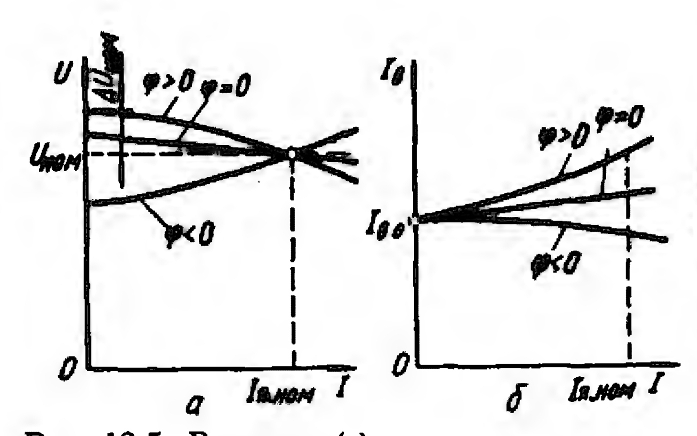


Рис. 12.5. Внешние (*а*) и регулировочные (*б*) характеристики синхронного генератора

При активно-индуктивной нагрузке (рис. 12.4, *б*) вектор $\dot{I}_я$ отстает от вектора $\dot{U}$ на угол φ, а вектор $j\dot{I}_я x_с$ пристроен к концу вектора напряжения перепендикулярно к вектору тока. Полученный вектор $\dot{E}_0$ возрос еще больше по сравнению с предыдущим случаем; вновь $U_0 = E_0 > U_{ном}$.

При активно-емкостной нагрузке (рис. 12.4, *в*) вектор $\dot{I}_я$ опережает вектор $\dot{U}$ на угол φ; аналогично предыдущему проведен вектор $j\dot{I}_я x_с$. Теперь уже $E_0 < U$, т. е.

$$U_0 = E_0 < U_{ном}.$$

Изложенное позволяет построить внешние характеристики при различных характерах нагрузки (рис. 12.5, *а*).

Итак, при чисто активной (φ = 0) и активно-индуктивной нагрузках (φ > 0) напряжение генератора с ростом тока уменьшается, а при активно-емкостной нагрузке (φ < 0) — растет.

Это объясняется тем, что в последнем случае действует продольно-намагничивающая реакция якоря, увеличивающая магнитный поток, а в двух первых — продольно-размагничивающая, уменьшающая поток. При чисто активной нагрузке угол ψ > 0, так как сама обмотка статора обладает значительной индуктивностью.

Номинальным изменением напряжения синхронного генератора называется изменение напряжения на выводах отдельно работающего генератора при изменении нагрузки от номинальной до холостого хода.

Изменение напряжения выражают в процентах:

$$\Delta u_{ном} = \frac{E_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100.$$

Синхронные генераторы обычно рассчитывают для работы с отстающим током при cos φ = 0,9÷0,8. Тогда при уменьшении нагрузки напряжение на зажимах генератора повышается, а изменение напряжения является положительным ($\Delta u_{ном} > 0$).

При активно-емкостной нагрузке изменение напряжения будет отрицательной величиной.

Изменение напряжения синхронных генераторов достаточно большое: $\Delta u_{ном} = 25 \div 35$ %, что осложняет работу потребителей. В настоящее время совершенные быстродействующие регуляторы позволяют поддерживать заданный уровень напряжения. С их помощью по необходимому закону меняется ток возбуждения, а значит, и магнитный поток. Как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение синхронного генератора оставалось неизменным, показывают регулировочные характеристики.

Регулировочные характеристики представляют собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_в = f(I_я)$ при $U = \text{const}$. Вид регулировочных характеристик при различном характере нагрузки показан на рис. 12.5, *б*, причем предполагается, что во всех трех случаях напряжение U одинаково.

Вид регулировочных характеристик объясняется также характером действия реакции якоря. При отстающем токе ($\varphi > 0$) для компенсации ее влияния на поток и напряжение с увеличением тока нагрузки $I_я$ необходимо увеличивать ток возбуждения $I_в$. При чисто активной нагрузке ($\varphi = 0$) размагничивающая продольная реакция якоря слабее и требуется меньшее увеличение $I_в$. При опережающем токе ($\varphi < 0$) для сохранения постоянства напряжения необходимо с увеличением тока $I_я$ уменьшить ток $I_в$.

12.6. Мощность и электромагнитный момент синхронной машины

Активная мощность. Рассмотрим векторную диаграмму на рис. 12.4, *б*, на которой сдвиг между векторами напряжения $\dot{U}$ и ЭДС $\dot{E}_0$ определяется *углом нагрузки* $\theta = \psi - \varphi$, а проекция вектора $\dot{E}_0$ на продолжение вектора $\dot{U}$ равна отрезку OB. Полученный в результате построения треугольник ABC подобен треугольнику CDO; следовательно, $\angle BAC = \varphi$.

Общая сторона AB двух треугольников OBA и CBA

$$AB = OA \sin\theta = AC \cos\varphi,$$

или с учетом модулей соответствующих векторов $E_0 \sin\theta = I_я x_c \cos\varphi$, откуда $I_я \cos\varphi = \frac{E_0}{x_c} \sin\theta$.

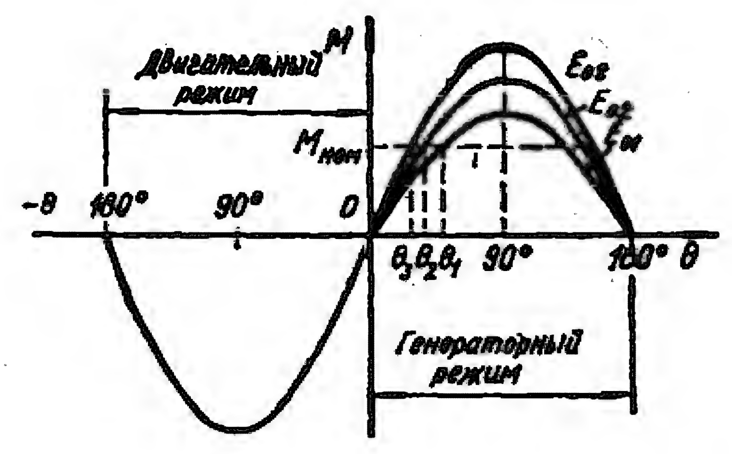


Рис. 12.6. Угловые характеристики неявнополюсной синхронной машины при различных токах возбуждения

Следовательно, активная мощность *m*-фазной машины

$$P = mUI_я \cos\varphi = \frac{mUE_0}{x_c} \sin\theta; \qquad (12.7)$$

она пропорциональна $\sin\theta$.

Электромагнитный момент. В синхронных машинах большой и средней мощностей электрические потери в обмотке статора малы по сравнению с мощностью *P*, отдаваемой (в генераторе) или потребляемой (в двигателе) этой обмоткой. Поэтому можно считать, что электромагнитная мощность $P_{эм} = P$; тогда электромагнитный момент [см. уравнение (11.16)] с учетом (12.7)

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{mUE_0}{\Omega_1 x_c} \sin\theta. \qquad (12.8)$$

Из уравнения (12.8) следует, что у неявнополюсной машины зависимость $M = f(\theta)$ есть синусоида, симметричная относительно осей координат. Отметим, что в явнополюсной машине эта зависимость несколько искажается, но дальнейшее объяснение процесса удобнее проводить на примере неявнополюсной машины.

Форма кривой $M = f(\theta)$ — ее называют *угловой характеристикой* (рис. 12.6) — обусловлена тем, что основной Φ_0 и результирующий $\Phi_{рез}$ магнитные потоки сдвинуты, как и векторы $\dot{E}_0$ и $\dot{U}$, на угол θ. Если $\theta = 0$ (холостой ход), то между ротором и статором существуют только силы притяжения и момент $M = 0$. При $\theta > 0$ (генераторный режим) ось потока Φ_0 опережает ось потока $\Phi_{рез}$ на угол θ. Упругие магнитные силовые линии «растягиваются», причем тем сильнее, чем больше нагрузка, т. е. поперечная реакция якоря. Ротор как бы «ведет» за собою статор. При этом соз-

дается тормозной момент M. Максимум момента соответствует значению $\theta = 90°$, когда ось полюсов расположена между осями результирующего потока.

При $\theta < 0$ (двигательный режим) ось потока Φ_0 отстает от оси потока $\Phi_{рез}$, ротор является «ведомым», «растянутые» магнитные силовые линии, увлекая его за собой, создают вращающий момент.

Отношение максимального момента (при $\theta = 90°$) к номинальному (при $\theta = \theta_{ном}$) характеризует *перегрузочную способность* машины $k_м = M_{max}/M_{ном} = 1/\sin\theta_{ном}$; чем меньше угол $\theta_{ном}$, тем больше перегрузочная способность. При $\theta > 90°$ магнитные силовые линии, связывающие статор и ротор, «разрываются», момент падает, устойчивая работа становится невозможной.

Если генератор работал параллельно с сетью, то при «разрыве» магнитных силовых линий магнитные поля ротора и статора начнут вращаться с разными частотами, их взаимодействие нарушится; происходит *выпадение из синхронизма,* которое является аварийным режимом, так как сопровождается протеканием по обмотке якоря больших токов.

Устойчивость генератора можно повысить, увеличив ток возбуждения; при этом возрастают ЭДС E_0 и, согласно (12.8), момент M_{max}. На рис. 12.6 изображены угловые характеристики при различных токах возбуждения, причем $E_{03} > E_{02} > E_{01}$, откуда следует, что при заданной нагрузке угол θ уменьшается с ростом тока возбуждения; значит, растет и значение $k_м$.

Реактивная мощность. Рассмотрим на примере неявнополюсной машины зависимость реактивной мощности Q от угла θ. На рис. 12.4, *б* сторона треугольника OBA $OB = OC + CB$, или с учетом модулей соответствующих векторов $E_0\cos\theta = U + I_я x_с \sin\varphi$, откуда $I_я \sin\varphi = (E_0\cos\theta - U)/x_с$.

Следовательно, реактивная мощность m-фазной машины

$$Q = mUI_я \sin\theta = mU\frac{E_0\cos\theta - U}{x_с}; \qquad (12.9)$$

она является функцией угла θ и максимальна при $\theta = 0$, т. е. при холостом ходе

$$Q_{max} = mU\frac{E_0 - U}{x_с}. \qquad (12.10)$$

Изменением значения E_0 (тока возбуждения) можно регулировать реактивную мощность. Если генератор работа-

ет параллельно с сетью, напряжение которой U, то возможно три случая регулирования: $E_0 = U$; $E_0 > U$ и $E_0 < U$.

Ток возбуждения $I_{в.н}$, при котором $E_0 = U$, называется *нормальным;* при этом $Q_{max} = 0$, а $\cos \varphi = 1$.

Если ток возбуждения больше нормального, т. е. $I_в > I_{в.н}$ (машина перевозбуждена), то $E_0 > U$ и $Q_{max} > 0$, т. е. реактивная мощность положительна, а синхронная машина по отношению к сети эквивалентна емкости (конденсатору).

Если $I_в < I_{в.н}$, то $E_0 < U$ и $Q_{max} < 0$, т. е. реактивная мощность отрицательна, а машина по отношению к сети эквивалентна индуктивности.

Таким образом, синхронная машина без активной нагрузки может использоваться для регулирования коэффициента мощности и поддержания нормального уровня напряжения в сетях; такая машина называется *синхронным компенсатором.*

Можно показать, что и в режиме активной нагрузки синхронная машина также обладает этим замечательным свойством — способностью изменять свою реактивную мощность и тем самым регулировать $\cos \varphi$ сетей.

Колебания синхронных машин. Некоторые колебательные движения вращающегося ротора на упругих магнитных силовых линиях, связывающих его со статором, возможны при нарушении равновесия между развиваемым электромагнитным моментом и моментом, приложенным к валу. Колебания связаны с изменением угла θ от одного значения к другому. Такие колебания называют *собственными.*

Колебания ротора приводят к пересечению стержнями успокоительной обмотки (см. п. 12.2) магнитного поля, в результате чего в ней и в сердечнике ротора текут вихревые токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем, «успокаивают» колебания.

Особую опасность представляют *вынужденные* колебания, вызванные неравномерным вращающим моментом приводного двигателя (например, дизеля на тепловозах) Если возникнет резонанс колебаний (совпадение собственных и вынужденных частот), то генератор может выпасть из синхронизма или может произойти поломка его вала. Колебаниям подвержены также синхронные двигатели.

12.7. Синхронные двигатели

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в режим двигателя, если к ее валу, отсоединив первичный двигатель, приложить тормозной момент. При этом машина потребляет из сети активную мощность и возникает вращающий момент. Частота вращения ротора остается *неизменной,* жестко связанной с частотой сети соотношением (12.1). Приведенные на рис. 12.6 угловые характеристики при $\theta < 0$ справедливы для двигательного режима.

Ценным свойством синхронного двигателя является его способность работать с $\cos\varphi = 1$ или даже с опережающим $\cos\varphi$ в режиме перевозбуждения.

Пуск в ход синхронного двигателя представляет определенные трудности, поскольку двигатель не имеет начального пускового момента. Если двигатель с возбужденным индуктором подключить к сети переменного тока, то ротор ввиду инерции не может быть сразу увлечен вращающимся полем статора, так как за один период изменения тока электромагнитный момент дважды изменит свое направление и устойчивая связь между полями ротора и статора не возникает. Следовательно, для пуска в ход необходимо *разогнать ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной.*

Источником такого внешнего момента может быть посторонний двигатель (асинхронный или постоянного тока). Но пуск при этом возможен практически без нагрузки. Когда ротор двигателя достигает частоты вращения, близкой к синхронной, статор подключается к сети.

Наибольшее распространение получил *асинхронный пуск.* В этом случае двигатель пускается в ход как асинхронный, для чего он снабжен специальной короткозамкнутой пусковой обмоткой (см. п. 12.2). При достижении частоты вращения, близкой к синхронной ($n \approx 0{,}95 n_1$), обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока, который создает синхронизирующий момент, и ротор втягивается в синхронизм. При асинхронном пуске обмотку возбуждения нельзя оставлять разомкнутой, так как вращающимся полем статора в ней может быть наведена очень большая ЭДС, опасная для целостности изоляции и обслуживающего персонала. Поэтому обмотку возбуждения на период пуска замыкают на резистор, сопротивление которого примерно в 10 раз превышает ее сопротивление.

В некоторых случаях возможен *частотный пуск,* когда двигатель питают от отдельного синхронного генератора,

частоту которого плавно поднимают от нуля. При этом двигатель приходит в синхронное вращение уже при небольшой частоте.

Сравнение синхронного двигателя с асинхронным позволяет отметить его достоинства и недостатки.

К достоинствам синхронного двигателя относятся:

а) возможность работы не только с $\cos\varphi = 1$, но и с опережающим $\cos\varphi$, что существенно улучшает коэффициенты мощности сетей; ток синхронного двигателя меньше, чем у асинхронного той же мощности;

б) меньшая чувствительность к колебаниям напряжения, так как его вращающий момент пропорционален напряжению в первой степени, а не в квадрате [ср. уравнения (12.8) и (11.26)];

в) строгое постоянство частоты вращения независимо от нагрузки на валу.

Недостатками синхронного двигателя являются:

а) сложность конструкции и дороговизна, особенно по сравнению с короткозамкнутым асинхронным двигателем;

б) сравнительная сложность пуска в ход;

в) трудности регулирования частоты вращения, которое возможно только изменением частоты питающего напряжения.

Контрольные вопросы

1. Почему машина называется синхронной, как создается в ней результирующий магнитный поток?
2. Какие существуют конструктивные типы синхронных машин и в чем их различие?
3. Как изменяется реакция якоря синхронного генератора в зависимости от характера нагрузки?
4. Чем определяется напряжение синхронного генератора? Напишите уравнение равновесия напряжений.
5. Объясните вид внешних характеристик синхронного генератора при различном характере нагрузок; что называется изменением его напряжения?
6. Что называется угловой характеристикой?
7. Как изменяется взаимное положение магнитных осей ротора и результирующего поля при работе в генераторном и двигательном режимах?
8. Что может привести к выпадению из синхронизма?
9. Как изменяется реактивная мощность синхронной машины при изменении тока возбуждения? Почему можно регулировать коэффициент мощности сетей?
10. Какие существуют способы пуска в ход синхронных двигателей?
11. Сравните эксплуатационные показатели асинхронных и синхронных двигателей; как изменяются их максимальные моменты при уменьшении напряжения сети на 20 %?

Раздел четвертый
НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Глава 13. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ И КПД ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

13.1. Классификация потерь

Преобразование энергии в электрических машинах и трансформаторах сопровождается потерями определенной ее части. Эти потери энергии можно подразделить на *основные* и *добавочные*.

Основные потери в электрических машинах складываются из потерь механических, потерь магнитных (в стали) и потерь электрических (или, как их называют, потерь в меди). В трансформаторах имеется только два последних вида потерь.

Добавочные потери возникают как в стальных, так и в медных частях машин и трансформаторов и вызываются вторичными процессами электромагнитного характера. К ним относятся потери на вихревые токи от полей рассеяния, поверхностные потери в стали, пульсационные потери в зубцах и т. д.

Все возникающие потери преобразовываются в теплоту и вызывают нагрев машин и трансформаторов.

Рассматриваемые в данной главе вопросы в основном являются общими для всех машин и трансформаторов с той лишь разницей, что в зависимости от типа машины в ней могут быть или не быть те или иные виды потерь.

Механические потери складываются из: 1) потерь в подшипниках $p_п$; 2) потерь на трение щеток о коллектор или контактные кольца $p_к$; 3) потерь на трение о воздух, включая сюда и вентиляционные потери $p_{в.н}$. Механические потери от нагрузки машины не зависят, а зависят только от частоты ее вращения. Они определяются по соответствующим, известным из механики, формулам и составляют около 1 % номинальной мощности машины. Таким образом,

$$p_{мх} = p_п + p_к + p_{вн}. \quad (13.1)$$

Потери в стали включают в себя потери на гистерезис и вихревые токи, вызванные перемагничиванием

стали сердечников. Эти потери в каждой части машины, имеющей массу G_c, при любых частоте f и индукции B рассчитывают по формуле

$$p_c = p_{1/50}(f/50)^{\beta} B^2 G_c, \qquad (13.2)$$

где $p_{1/50}$ — удельные потери для данной марки стали при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц; $\beta \approx 1{,}5$ или несколько меньше в зависимости от марки стали.

Электрические потери состоят из потерь в меди

$$p_м = I^2 R \qquad (13.3)$$

и переходных потерь в контакте щеток

$$p_щ = \Delta U_щ I, \qquad (13.4)$$

где $\Delta U_щ$ — падение напряжения в щеточном контакте, которое, согласно ГОСТ 2582—81, равно 3 или 2 В соответственно для щеток без шунтов или с шунтами.

Добавочные потери практически не могут быть рассчитаны ввиду весьма сложного характера их возникновения. Поэтому для всех электрических машин их принимают, согласно ГОСТ 11828—75, равными 0,5—1 % номинальной мощности, а для тяговых двигателей, согласно ГОСТ 2582—81,— 30 % потерь в стали при номинальной нагрузке. При изменении нагрузки можно считать, что добавочные потери изменяются пропорционально квадрату тока.

Полные потери представляют собой сумму всех потерь:

$$\Sigma p = p_{мх} + p_c + p_м + p_щ + p_{доб}, \qquad (13.5)$$

и их можно разделить на три группы:

1) потери, не зависящие от тока, $p_0 = p_{мх} + p_c$;

2) потери, зависящие от тока, $p_щ$;

3) потери, зависящие от квадрата тока, $p_м + p_{доб}$.

Пусть $p_{щ\,ном}$ — номинальное значение потерь, пропорциональных току, а $p_{м.ном}$ — номинальное значение потерь, пропорциональных квадрату тока. Тогда

$$\Sigma p = p_0 + \frac{I}{I_{ном}} p_{щ.ном} + \left(\frac{I}{I_{ном}}\right)^2 p_{м.ном} = p_0 + k_н p_{щ.ном} + k_н^2 p_{м.ном}, \qquad (13.6)$$

где $k_н = I/I_{ном}$ — коэффициент нагрузки.

Переходные потери в контакте щеток даже у машин постоянного тока относительно малы. Их значение у высоковольтных машин небольшой мощности составляет обычно доли процента, а у сравнительно мощных низковольтных ма-

шин — 2 ÷ 5 % полных потерь. Это обстоятельство позволяет данным видом потерь в первом приближении пренебречь, т. е. считать $k_н p_{щ.ном} = 0$. Тогда выражение (13.6) принимает вид

$$\Sigma p = p_0 + k_н^2 p_{м.ном}. \qquad (13.7)$$

13.2. КПД и его определение

КПД машины или трансформатора представляет собой отношение полезной (отдаваемой) P_2 к подведенной P_1; его можно выражать в относительных единицах $\eta = P_2/P_1$ или в процентах $\eta = (P_2/P_1) \cdot 100$.

Современные электрические машины и трансформаторы имеют очень высокий КПД. У машин мощностью 50 кВт он составляет 85—90 %, мощностью 200 кВт — 90 ÷ 92 %, мощностью 400—700 кВт — 93 ÷ 95 %. Мощные трансформаторы имеют еще более высокий КПД, достигающий 99 ÷ 99,5 %.

Таким образом, разница между значениями P_2 и P_1 сравнительно мала, что накладывает определенные трудности при опытном или аналитическом определении КПД. Поэтому для различных условий удобнее определять КПД по видоизмененным формулам, имея в виду, что $P_1 = P_2 + \Sigma p$.

Для двигателя, у которого легко измерить подведенную электрическую мощность $P_1 = U_{дв} I$, КПД

$$\eta_{дв} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1}. \qquad (13.8)$$

Для генератора, у которого отдаваемая мощность $P_2 = U_г I$, выражение (13.8) можно представить в виде

$$\eta_г = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}; \qquad (13.9)$$

при этом получается более точный результат, так как значение потерь Σp составляет лишь небольшую часть полезной мощности P_2.

Проанализируем изменение КПД в зависимости от нагрузки, взяв для примера генератор постоянного тока, хотя аналогичный результат может быть получен для любой машины или трансформатора.

Полезная мощность генератора, имеющего номинальную мощность $P_{2ном} = U_г I_{ном}$, при произвольно выбранном токе I составляет

$$P_2 = U_г I = U_г k_н I_{ном} = k_н P_{2ном}.$$

Выражение (13.9) с учетом (13.6) при этом принимает вид

$$\eta_г = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \frac{k_н P_{2ном}}{k_н (P_{2ном} + p_{щ.ном}) + p_0 + k_н^2 p_{м.ном}}. \quad (13.10)$$

Из (13.10) следует, что при холостом ходе ($k_н = 0$) КПД равен нулю, так как полезной мощности нет. С ростом нагрузки КПД быстро повышается за счет увеличения полезной мощности $P_2 = k_н P_{2ном}$, но одновременно быстрее, чем P_2, растут потери, пропорциональные квадрату тока, $k_н^2 p_{м.ном}$. Поэтому рост КПД замедляется и после достижения максимума при некотором значении $k_н$ КПД постепенно падает. Зависимость КПД от коэффициента нагрузки показана на рис. 13.1.

Для нахождения условий, при которых КПД достигает максимума, возьмем производную от η по $k_н$ и приравняем ее нулю. Сделаем это на примере двигателя постоянного тока, когда $P_{1дв} = U_{дв} I$, так что

$$\eta_{дв} = 1 - \frac{\Sigma p}{U_{дв} I} = 1 - \frac{\Sigma p}{U_{дв} k_н I_{ном}}.$$

Тогда

$$\frac{d\eta_{дв}}{dk_н} = -\frac{\frac{d\Sigma p}{dk_н} U_{дв} k_н I_{ном} - U_{дв} I_{ном} \Sigma p}{U_{дв}^2 k_н^2 I_{ном}^2} = -\frac{\frac{d\Sigma p}{dk_н} k_н - \Sigma p}{U_{дв} k_н^2 I_{ном}} = 0.$$

Очевидно, дробь эта равна нулю, если числитель ее равен нулю, т. е. $(d\Sigma p/dk_н)\, k_н - \Sigma p = 0$, или с учетом (13.6)

$$(d\Sigma p/dk_н)\, k_н = \Sigma p = p_0 + k_н p_{щ.ном} + k_н^2 p_{м.ном}.$$

Отсюда

$$(0 + p_{щ.ном} + 2k_н p_{м.ном})\, k_н = p_0 + k_н p_{щ.ном} + k_н^2 p_{м.ном}.$$

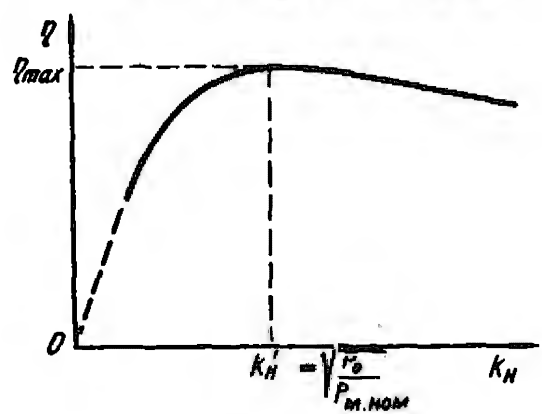


Рис. 13.1. Зависимость КПД от коэффициента нагрузки электрических машин и трансформаторов

Преобразовав последнее выражение, получим

$$k_н^2 p_{м.ном} = p_0, \quad (13.11)$$

т. е. *КПД достигает максимума, когда потери, зависящие от квадрата тока, равны потерям, не зависящим от тока.*

При проектировании машин или трансформаторов соотношение их потерь выбирают таким, чтобы КПД был мак-

симален в области нагрузок, при которых машина или трансформатор работает более продолжительное время.

Согласно ГОСТ 11828—75, потери и КПД можно определять двумя методами.

Метод непосредственного определения, заключающийся в измерении мощностей P_2 и P_1, допустим для машин, имеющих $\eta \leqslant 75$ %, поскольку погрешность при измерении может сильно исказить истинный результат ввиду близости значений P_2 и P_1. Для трансформаторов по этой причине такой метод определения КПД вообще недопустим.

Метод косвенного определения заключается в том, что по данным измерений отдельных потерь рассчитывают полные потери. Например, при проведении опыта холостого хода измеряют ток I_0 и напряжение U; тогда $p_0 = UI_0$. Остальные потери ($p_м$, $p_щ$ и $p_{доб}$) определяют вычислением по соответствующим формулам.

КПД трансформаторов вычисляют по формуле (13.9), полагая, что

$$P_2 = U_{2ном}k_н I_{2ном} \cos\varphi_2 = k_н S_{ном} \cos\varphi_2; \qquad (13.12)$$

$$\Sigma p = p_с + k_н^2 p_{м.ном} = P_0 + k_н^2 P_к, \qquad (13.13)$$

где $S_{ном} = U_{2ном}I_{2ном}$ — номинальная мощность трансформатора, а P_0 и $P_к$ — соответственно мощности холостого хода и короткого замыкания (см. п. 8.8 и 8.9).

При наличии двух совершенно одинаковых машин постоянного тока (например, тяговых двигателей) КПД можно определить *методом взаимной нагрузки,* соединив обе машины механически и электрически. При этом одна из машин работает двигателем, а другая — генератором: двигатель вращает генератор, а генератор питает двигатель электроэнергией. Из сети поступает только энергия, необходимая для покрытия потерь в обеих испытуемых машинах, что делает данный метод весьма экономичным.

Контрольные вопросы и задачи

1. Какие существуют виды потерь энергии и как они возникают?
2. Как можно классифицировать потери в зависимости от тока нагрузки?
3. Что называют КПД и по каким формулам его следует определять для двигателя, генератора и трансформатора?
4. Объясните характер изменения зависимости КПД от значения нагрузки. При каких условиях КПД максимален?
5. Какие существуют способы определения КПД?
6. Чему равен КПД трансформатора, если $P_2 = 920$ кВт; $p_с = 5{,}1$ кВт; $p_м = 15$ кВт?
7. При испытании методом взаимной нагрузки двух тяговых двигателей сумма потерь в агрегате составила 50 кВт при напряжении 1500 В и токе 300 А. Определить КПД машин и их мощность.

Глава 14. НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

14.1. Перегрев и его определение

В электрических машинах и трансформаторах в результате выделяемой теплоты в наибольшей степени страдают изоляционные материалы (см. п. В.7). Однако высокая температура влияет на работоспособность и других элементов: коллектор может потерять цилиндрическую форму и может даже произойти выплавление «петушков», могут выйти из строя подшипники, произойти термическое расширение и разрушение стержней обмоток и т. п.

Передача теплоты от более нагретых частей машины к менее нагретым и в окружающую среду происходит путем теплопроводности, лучеиспусканием и конвенцией.

Температура той или иной части машины зависит не только от режима ее работы, но и от температуры окружающей среды и температуры охлаждающих агентов, если речь идет о специальных замкнутых циклах охлаждения. Поэтому в практике оперируют *температурой перегрева* τ части машины над охлаждающей средой. При этом стандартом установлена допустимая предельная температура охлаждающей среды (чаще всего это окружающий воздух) $\vartheta_0 = +40$ °С. Если машина работает в среде, где $\vartheta_0 > > +40$ °С, то во избежание недопустимых перегревов нагрузка ее должна быть снижена.

Таким образом, абсолютная температура нагретой машины

$$\vartheta_{гор} = \tau + \vartheta_0. \qquad (14.1)$$

Температуру различных частей машин и трансформаторов можно определять: 1) термометром; 2) методом сопротивления, основанным на изменении сопротивления проводника при изменении температуры; 3) термоиндикаторами.

Термометром измеряют температуру коллектора; термоиндикаторы (термопары) встраивают в скрытые части машины и используют в основном в исследовательских целях.

В условиях эксплуатации наибольшее применение нашел метод сопротивления, недостатком которого является то, что он позволяет определить среднюю температуру проводника или обмотки.

Для тяговых машин ГОСТ 2582—81 предписывает со-

противление обмоток ненагретой машины r_{20} приводить к 20 °С. Тогда при любых температурах в холодном $\vartheta_{хол}$ и горячем $\vartheta_{гор}$ состояниях сопротивления равны соответственно

$$r_{хол} = r_{20}[1 + \alpha(\vartheta_{хол} - 20)]; \qquad (14.2)$$

$$r_{гор} = r_{20}[1 + \alpha(\vartheta_{гор} - 20)], \qquad (14.3)$$

где α — температурный коэффициент материала проводника, равный увеличению его сопротивления при повышении температуры на 1 °С; для меди $\alpha = 1/_{250}$, а для алюминия $\alpha \approx 1/_{260}$.

Разделив (14.3) на (14.2) и преобразовав, получим

$$\vartheta_{гор} = \frac{r_{гор}}{r_{хол}}(230 + \vartheta_{хол}) - 230. \qquad (14.4)$$

Решение уравнения (14.4) может быть недостаточно точным ввиду близости значений $r_{гор}$ и $r_{хол}$. Точность можно повысить, если к числителю правой части (14.4) прибавить и отнять от него $r_{хол}$; тогда

$$\vartheta_{гор} = \frac{r_{гор} + r_{хол} - r_{хол}}{r_{хол}}(230 + \vartheta_{хол}) - 230 =$$

$$= \frac{r_{гор} - r_{хол}}{r_{хол}}(230 + \vartheta_{хол}) + \vartheta_{хол}. \qquad (14.5)$$

Следовательно, согласно (14.1), перегрев

$$\tau = \vartheta_{гор} - \vartheta_0 = \frac{r_{гор} - r_{хол}}{r_{хол}}(230 + \vartheta_{хол}) + \vartheta_{хол} - \vartheta_0. \qquad (14.6)$$

Если за сопротивление обмотки в холодном состоянии принимать его значение, приведенное к 20 °С, то

$$\tau = 250\frac{r_{гор} - r_{20}}{r_{20}} + 20 - \vartheta_0. \qquad (14.7)$$

При использовании формул (14.4) — (14.7) для алюминиевых обмоток следует подставлять 240 вместо 230 и 260 вместо 250.

14.2. Нагревание и охлаждение твердого тела

Как показывает практика, нагревание отдельных частей электрических машин и трансформаторов хорошо согласуется с теорией нагревания твердого тела, обладающего бесконечно большой теплопроводностью и равномерно

рассеивающего теплоту со всей поверхности. Действительно, части машин монолитны, а материалы, из которых они изготовлены (сталь и медь), имеют высокую теплопроводность. Весьма монолитна и изоляция современных машин и трансформаторов.

Пусть в единицу времени в теле выделяется Q единиц теплоты. Тогда за бесконечно малое время dt выделится теплота Qdt, а температура тела повысится на $d\tau$ градусов. Если масса тела G, а удельная тепломкость c (количество теплоты, необходимой для нагревания 1 кг вещества на 1 °С), то тело поглотит $Gcd\tau$ единиц теплоты.

Пусть в это же время превышение (перегрев) температуры тела по отношению к окружающей среде равно τ градусов. Значит, с поверхности тела площадью S при коэффициенте теплоотдачи λ (количество теплоты, рассеиваемой с единицы поверхности в 1 с при повышении температуры на 1 °С) в окружающую среду будет рассеяно $S\lambda\tau dt$ тепловой энергии. Поэтому дифференциальное уравнение нагревания тела можно записать так:

$$Qdt - S\lambda\tau dt = Gcd\tau. \qquad (14.8)$$

С течением времени перегрев τ повышается, второй член в левой части уравнения растет, поэтому правая его часть уменьшается. Процесс нагревания постепенно замедляется, и, наконец, при каком-то конечном перегреве $\tau_к$ вся теплота будет рассеиваться в окружающую среду, т. е. повышение температуры тела прекратится ($d\tau = 0$). В этом случае уравнение (14.8) примет вид

$$Qdt - S\lambda\tau_к dt = 0,$$

откуда

$$\tau_к = Q/(S\lambda). \qquad (14.9)$$

Из уравнения (14.9) следует, что конечный перегрев тела от его массы и теплоемкости не зависит, а прямо пропорционален тепловому потоку Q и обратно пропорционален площади поверхности тела S и коэффициенту теплоотдачи λ.

Разделив (14.8) на $S\lambda$, получим

$$\frac{Q}{S\lambda} dt - \tau dt = \frac{Gc}{S\lambda} d\tau. \qquad (14.10)$$

Оказывается, что множитель $\frac{Gc}{S\lambda}$ в правой части уравнения (14.10) имеет размерность времени. Действительно, так как, согласно (14.9), $S\lambda = Q/\tau_к$, то

$$T = Gc/(S\lambda) = Gc\tau_к/Q. \qquad (14.11)$$

Величины, входящие в (14.11), имеют следующие размерности: G — кг, c — $\frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{^\circ\text{C}\cdot\text{кг}}$, $\tau_к$ — °С и Q — Вт; поэтому величина T измеряется в секундах. Она называется *постоянной времени нагревания* и представляет собой время, в течение которого тело массой G с удельной теплоемкостью c нагревается до конечной температуры $\tau_к$, если в нем выделяется тепловой поток Q и рассеивания теплоты не происходит.

Поскольку масса G пропорциональна кубу размеров тела, а площадь S — квадрату его размеров, постоянная T пропорциональна линейным размерам тела. Величина T характеризует *скорость протекания тепловых процессов*. Например, для тяговых электродвигателей, имеющих осевую длину и одинаковый с нею поперечный размер около 1 м, постоянная $T \approx 1$ ч.

Подставив (14.9) и (14.11) в (14.10) и преобразовав полученное выражение, найдем $(\tau_к - \tau)\,dt = Td\tau$, или

$$\frac{dt}{T} = \frac{d\tau}{\tau_к - \tau}. \qquad (14.12)$$

Интегрирование (14.12) дает

$$\frac{t}{T} = -\ln(\tau_к - \tau) + C,$$

где постоянная интегрирования C находится из условия того, что в начальный момент времени ($t = 0$) превышение температуры поверхности тела над окружающей средой равно τ_0. Тогда

$$0 = -\ln(\tau_к - \tau_0) + C, \text{ или } C = \ln(\tau_к - \tau_0),$$

так что

$$\frac{t}{T} = \ln\frac{\tau_к - \tau_0}{\tau_к - \tau}.$$

Отсюда окончательно находим τ как функцию времени t:

$$\tau = \tau_к(1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T}, \qquad (14.13)$$

где $e = 2{,}718$ — основание натуральных логарифмов.

Если в начальный момент времени ($t = 0$) тело имело температуру окружающей среды, т. е. $\tau_0 = 0$, то

$$\tau = \tau_к(1 - e^{-t/T}). \qquad (14.14)$$

В этом виде уравнение для определения перегрева тела представляет наибольший практический интерес. Кривая *1*, построенная по уравнению (14.14), изображена на

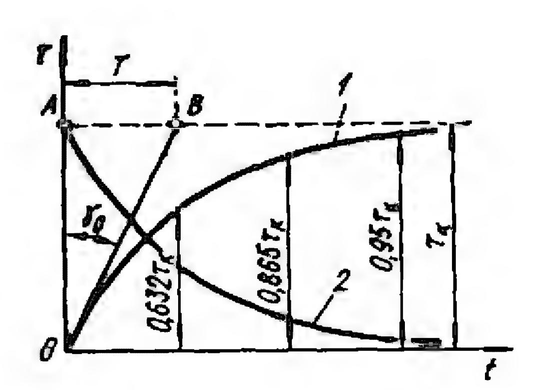



Рис. 14.1. Кривые нагревания (*1*) и охлаждения (*2*) твердого тела

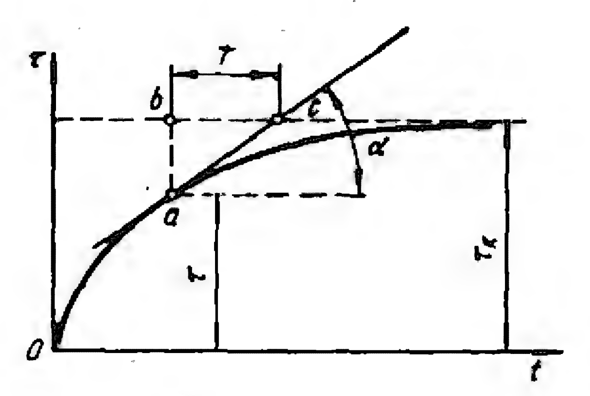


Рис. 14.2. Графическое определение постоянной времени нагревания

рис. 14.1.Из уравнения (14.14) следует, что $\tau = \tau_к$ при $t = \infty$, т. е. тело достигает установившегося перегрева через бесконечнс большое время. Однако, так как $\tau/\tau_к = 1 - e^{-t/T}$, то можно составить следующую зависимость:

t/T	1	2	3	4	5
$\tau/\tau_к$	0,632	0,865	0,950	0,982	0,993

Таким образом, можно считать, что при $t = (4 \div 5)\,T$ тепловой процесс установился.

Постоянную времени нагревания тела можно определить следующим образом. Проведя к кривой нагревания (рис. 14.2) под углом α к оси абсцисс касательную в любой произвольно взятой точке a и продолжив ее до пересечения в точке c с линией конечной температуры $\tau_к$, из прямоугольного Δabc с учетов уравнения (14.12.) имеем:

$$bc = \frac{ab}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{\tau_к - \tau}{d\tau/dt} = T.$$

Иначе говоря, постоянная времени нагревания T есть подкасательная, отсекаемая касательной на прямой конечного превышения температуры. Значит T можно определить, проведя касательную к кривой нагревания через начало координат (рис. 14.1).

Если к достигшему перегрева $\tau_к$ телу приток теплоты прекратился ($Q = 0$), то начинается процесс остывания, который может быть описан исходя из следующих соображений. В начальный момент остывания $\tau_{0ост} = \tau_к$, а в конце остывания температура тела достигает температуры окружающей среды, т. е конечный перегрев в процессе остывания $\tau_{к.ост} = 0$. Подставив эти значения в уравнение (14.13), получим уравнение остывания тела

$$\tau = \tau_к e^{-t/T}. \qquad (14.15)$$

Кривая *2*, построенная по уравнению (14.15), показана на рис. 14.1. Как видно, она представляет собой зеркальное отображение кривой *1*.

14.3. Нагревание машин при различных номинальных режимах работы

Правильно выбранный тепловой режим нагрузки электрической машины будет таким, когда ее изоляционные материалы используются хотя и на пределе, но без превышения допустимых перегревов, т. е. когда конечная температура нагрева одновременно является и допустимой ($\tau_к = \tau_{доп}$).

На основании этих соображений ГОСТ 183—74 устанавливает три основных номинальных режима работы электрической машины: 1) продолжительный, или длительный; 2) кратковременный; 3) повторно-кратковременный.

При *продолжительном режиме* работы части сколь угодно долго работающей машины достигают установившейся температуры, не превышающей допустимой для данного класса изоляции. Процесс нагревания описывается уравнением (14.14) и графически изображается кривой *1* на рис. 14.1.

Кратковременным режимом называется режим, включающий рабочее время $t_р$ и время паузы $t_п$. Время $t_р$ выбирается из условия, что в течение его температура достигнет допустимого, но не конечного значения, после чего наступает пауза, в конце которой температура машины становится равной температуре окружающей среды.

Соответствующий график теплового процесса показан на рис. 14.3, *а*. При нагрузке машины, соответствующей кратковременному режиму, $\tau_{кр} = \tau_{доп} < \tau_к$, т. е. при заданных размерах мощность машины в кратковременном режиме больше, чем в продолжительном. Если бы по истечении времени $t_р$ машина продолжала еще работать, то ее конечный перегрев превысил бы допустимый ($\tau_к > \tau_{доп}$), что способствовало бы ускоренному старению и выходу изоляции из строя. ГОСТ 2582—81 устанавливает длительность рабочего времени $t_р$ = 15, 30, 40, 60 мин (часовой режим) и 90 мин.

Повторно-кратковременный режим характеризуется наличием циклов, состоящих из рабочего времени $t_р$ и паузы $t_п$. Соотношение между ними подбирается так, чтобы за время работы перегрев не превысил допустимого, а за время паузы температура несколько упала, но не до темпера-

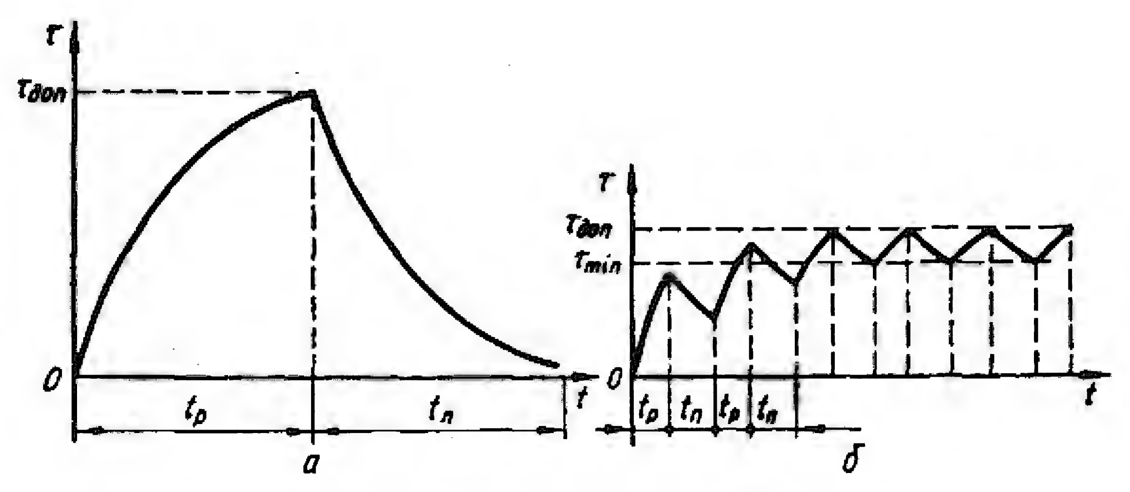


Рис. 14.3. Кривые нагревания при кратковременном (*а*) и повторно-кратковременном (*б*) режимах работы электрической машины

туры окружающей среды. Режим характеризуется *относительной продолжительностью включения* (%):

$$\text{ПВ} = \frac{t_\text{р}}{t_\text{р} + t_\text{п}} \cdot 100.$$

График теплового процесса в этом режиме показан на рис. 14.3, *б*. Начав работу при $\tau_0 = 0$, машина постепенно нагревается, пока не достигнет некоторого установившегося режима, характеризуемого зигзагообразной кривой. При этом температура машины колеблется между максимальным значением $\tau_{\max} = \tau_\text{доп}$ и минимальным $\tau_{\min}$.

Длительность рабочего цикла $t_\text{р} + t_\text{п} \leqslant 10$ мин, в противном случае двигатель выбирают, как и при продолжительном режиме. Согласно ГОСТ 2582—81 значения ПВ составляют 15, 25, 40, 50 и 60 %.

Очевидно, в повторно-кратковременном режиме мощность машины будет меньше, чем в кратковременном, но больше, чем в длительном.

14.4. Охлаждение машин и трансформаторов

Большая загрузка современных машин требует применения интенсивных охлаждающих систем. В подавляющем большинстве машины охлаждают атмосферным воздухом, и только в мощных синхронных генераторах в качестве охлаждающего агента используют водород и даже воду.

Ведутся работы по созданию крупных электрических машин с применением жидкого гелия. В этих машинах используется явление *сверхпроводимости*, т. е. свойство проводника терять сопротивление при температурах, близких к абсолютному нулю (—273 °С).

Такие машины получили название *криогенных*, от греческого слова «криос», что означает холод. Снижение потерь в криогенных машинах позволяет существенно повысить их КПД и уменьшить размеры, создавая машины очень большой единичной мощности.

Необходимым элементом криогенной машины является криостат, т. е. изолированная от внешней среды емкость, заполненная жидким гелием. Внутри криостата располагают охлаждаемую обмотку или даже всю машину целиком.

Силовые трансформаторы, как правило, имеют масляное охлаждение. Масло циркулирует в баке и охладителях или, при необходимости интенсивного охлаждения, в специально обдуваемых масляных радиаторах. Но имеются силовые трансформаторы и с воздушным или газовым охлаждением. В качестве охлаждающего газа используется шестифтористая сера (SF_6), коэффициент теплопередачи которой в 2,18 раза больше, чем воздуха.

По способу охлаждения машины подразделяются на несколько групп. Машины очень малой мощности имеют *естественное* охлаждение. Машины с внутренней самовентиляцией охлаждаются с помощью *встроенных вентиляторов*, насаженных на вал и вращающихся вместе с ротором машины. Существует и *наружная* самовентиляция, когда внешняя поверхность обдувается с помощью насаженного на выведенный конец вала вентилятора, а внутренние части машины закрыты для доступа внешнего воздуха.

Мощные машины имеют *независимое* или *принудительное* охлаждение. Воздух при этом подается внутрь машины специальным вентилятором, имеющим самостоятельный привод. Независимая вентиляция может быть *протяжной* или *замкнутой*. В последнем случае значительно легче предотвратить загрязнение машины пылью, всегда содержащейся в воздухе. Особое значение замкнутая система вентиляции имеет для локомотивов промышленного транспорта, работающих в чрезвычайно запыленной среде.

Вентиляция воздухом электрических машин бывает *осевой*, когда воздух по специальным каналам и по поверхности ротора проходит в осевом направлении, или *радиальной*, когда воздух проходит по радиальным каналам внутри ротора и статора машины. Может быть и *смешанная* радиально-осевая вентиляция.

В машинах постоянного тока воздух, как правило, подается со стороны коллектора. При этом достигается наилучший эффект охлаждения такого ответственного узла, как коллектор. Щеточная пыль, наличие которой способ-

ствует возникновению круговых огней, также лучше всего удаляется при подаче воздуха в первую очередь на коллектор.

Расход охлаждающей среды, необходимой для отвода теплоты из машины или трансформатора, составляет

$$Q = \frac{\Sigma p}{c(\vartheta_{\text{гор}} - \vartheta_0)},$$

где c — теплоемкость охлаждающей среды; $\vartheta_{\text{гор}}$ — температура выходящей из машины нагретой охлаждающей среды.

Для воздуха $c = 1100 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{{}^\circ\text{C} \cdot \text{м}^3}$; в зависимости от системы вентиляции, конструкции машины и ее мощности $(\vartheta_{\text{гор}} - \vartheta_0) = 15 \div 25\ {}^\circ\text{C}$. Следовательно, на 1000 Вт потерь необходимое количество воздуха

$$Q = \frac{1000}{1100(15 \div 25)} = 0{,}036 \div 0{,}06\ \text{м}^3/\text{с}.$$

Для тяговых двигателей локомотивов расход охлаждающего воздуха составляет приблизительно 0,05 м^3/с.

Для трансформаторного масла $c = 1400 \cdot 1100 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{{}^\circ\text{C} \cdot \text{м}^3}$; соответственно его объемный расход в 1400 раз меньше, чем воздуха.

Контрольные вопросы

1. Что называется перегревом и какие существуют способы его определения?
2. Чем определяется конечный перегрев части машины?
3. Что такое постоянная времени нагревания, что она характеризует и чем определяется? Через сколько постоянных времени можно считать тепловой процесс установившимся?
4. Какие существуют основные номинальные режимы работы, чем они отличаются по допустимой нагрузке от электрических машин?
5. Как охлаждают электрические машины и трансформаторы?

Глава 15. ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ И МАССА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

15.1. Электромашинная постоянная

Теория и практика современного электромашиностроения выработали определенные зависимости размеров машин от их электромагнитных нагрузок, частоты питающей сети, частоты вращения и т. п.

Одним из технико-экономических показателей машины является *электромашинная постоянная*. Выведем ее уравнение на примере машины постоянного тока, хотя ее конечное выражение справедливо для любых типов машин.

Электромагнитный момент, согласно выражению (3.29),

$$M_{эм} = \frac{pN}{2a\pi} \Phi_o I_я = \frac{pN}{2a\pi} \alpha B_\delta \frac{\pi D_я}{2p} l_я I_я, \qquad (15.1)$$

где $\Phi_o = \alpha B_\delta \frac{\pi D_я}{2p} l_я$ получено в результате совместного решения (3.21) и (3.23).

Согласно уравнению (4.1), $I_я = 2a\pi D_я A/N$; подставив это значение тока в (15.1) и преобразовав, получим

$$M_{эм} = \frac{\pi}{2} A\alpha B_\delta D_я^2 l_я,$$

или

$$\frac{D_я^2 l_я}{M_{эм}} = \frac{2}{\pi A \alpha B_\delta}. \qquad (15.2,а)$$

В правой части уравнения (15.2, а) сгруппированы величины, которые на данном историческом этапе развития науки и техники являются постоянными, поскольку ими — линейной нагрузкой A и индукцией B_δ — определяются физические свойства материалов по возможностям их токовой и магнитной нагрузки. Для тяговых двигателей эти величины выбираются предельно возможными; такие машины называют *машинами предельного исполнения* (значения α; B_δ и A указаны в п. 2.1, 2.3 и 4.2). Очевидно, чем больше значения A и B_δ, тем меньше может быть взята величина $D_я^2 l_я$ для создания требуемого момента $M_{эм}$.

Формула (15.2, а) наглядно показывает, что *размеры машины (ее объем) определяются не мощностью, а электромагнитным моментом.*

Поскольку $M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\Omega} = P_{эм}/(2\pi n)$, формуле (15.2,а) можно придать вид

$$\frac{D_я^2 l_я n}{P_{эм}} = \frac{1}{\pi^2 A \alpha B_\delta} = C_A. \qquad (15.2,б)$$

Величина C_A называется *электромашинной постоянной* (постоянной Арнольда); она устанавливает общую зависимость основных размеров машины от удельных нагрузок, характеризуя «объемный» расход материалов якоря.

Формула (15.2, б) показывает, что при данных размерах (объеме якоря) мощность машины можно повысить пропорционально частоте вращения, т. е. *при заданной мощности более скоростные машины меньше по размерам, а значит, легче и дешевле.*

15.2. Влияние частоты на размеры машин и трансформаторов

Как показывает опыт, асинхронные двигатели мощностью до 100 кВт получаются наиболее компактными при четырех- и шестиполюсном исполнении, т. е. $p = 2$ или 3. Если эту величину принять неизменной, то поскольку $f_1 = pn_1$, желательно увеличивать частоту f_1, так как при этом растет значение n_1 и, согласно (15.2, б), размеры машины и ее масса уменьшаются (несмотря на то, что с ростом частоты, чтобы не допустить большого роста потерь, приходится несколько снижать электромагнитные нагрузки).

При увеличении частоты уменьшаются и размеры трансформатора. Увеличим частоту от f_1 до f_2, сохранив при этом неизменными потери в стали. Тогда, согласно (13.2), следует выдержать равенство $f_1^{\beta}B_1^2 = f_2^{\beta}B_2^2$, где примем $\beta = 4/3 = 1{,}333$. Следовательно,

$$B_2 = \sqrt{B_1^2\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{4/3}} = B_1\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{2/3}. \qquad (15.3)$$

Поскольку у трансформатора, согласно (8.4), $E = 4{,}44wf\Phi_m$, а $\Phi_m = BQ_{ст}$, где $Q_{ст}$ — площадь поперечного сечения стержня магнитопровода, полная мощность

$$S_{ном} = EI_{ном} = 4{,}44wfBQ_{ст}I_{ном}. \qquad (15.4,а)$$

Если обозначить плотность тока в проводнике через j, а его площадь поперечного сечения — q, то $I_{ном} = jq$; тогда формула (15.4, а) примет вид

$$S_{ном} = 4{,}44fBQ_{ст}jqw. \qquad (15.4,б)$$

Поскольку плотность тока — величина для многих трансформаторов практически постоянная ($j \approx 3 \div 4$ А/мм²), можно считать, что произведение площади поперечного сечения проводника на число витков определяет площадь поперечного сечения окна $Q_{ок}$, в котором размещаются обмотки трансформатора. С учетом этого уравнение (15.4, б)

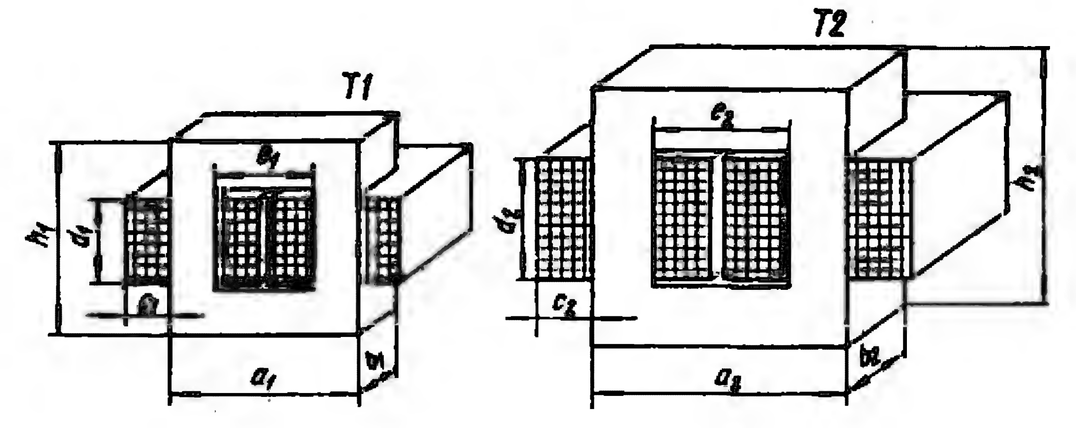


Рис. 15.1. Геометрически подобные трансформаторы

приобретает вид

$$Q_{ст}Q_{ок} = \frac{S_{ном}}{cfB}, \qquad (15.5)$$

где $c = 4{,}44j$.

Представим себе, что у двух подобных по конструкции трансформаторов все линейные размеры (длина, ширина и высота) отличаются в λ раз. Тогда на рис. 15.1 $a_2/a_1 = b_2/b_1 = c_2/c_1 = d_2/d_1 = e_2/e_1 = h_2/h_1 = \lambda$. Очевидно, что при этом отношение площадей поперечных сечений стержней и окон $Q_{ст2}/Q_{ст1} = Q_{ок2}/Q_{ок1} = \lambda^2$.

При одних и тех же частотах и индукциях, согласно выражению (15.5),

$$\frac{Q_{ст2}Q_{ок2}}{Q_{ст1}Q_{ок1}} = \frac{S_{ном2}}{S_{ном1}} = \lambda^4. \qquad (15.6)$$

Масса m и габаритный объем V трансформатора изменяются пропорционально кубу его линейных размеров, т. е.

$$m_2/m_1 = V_2/V_1 = \lambda^3. \qquad (15.7)$$

Для трансформатора при частоте f_1, согласно (15.5),

$$Q_{ст1}Q_{ок1} = \frac{S_{ном}}{cf_1B_1}, \qquad (15.8)$$

а при частоте f_2 с учетом (15.3)

$$Q_{ст2}Q_{ок2} = \frac{S_{ном}}{cf_2B_1(f_1/f_2)^{2/3}}. \qquad (15.9)$$

Разделив (15.9) на (15.8), с учетом (15.6) получим $\frac{Q_{ст2}Q_{ок2}}{Q_{ст1}Q_{ок1}} = \frac{f_1}{f_2(f_1/f_2)^{2/3}} = (f_1/f_2)^{1/3} = \lambda^4$,

или

$$\lambda = \sqrt[4]{(f_1/f_2)^{1/3}} = (f_1/f_2)^{1/12}. \qquad (15.10)$$

Подставив это значение λ в уравнение (15.7), получим

$$m_2/m_1 = V_2/V_1 = (f_1/f_2)^{1/4}. \quad (15.11)$$

Представим себе, что частота повышена с $f_1 = 50$ Гц до $f_2 = 400$ Гц; тогда масса и объем трансформатора станут $m_2 = m_1 \left(\frac{50}{400}\right)^{1/4} = 0{,}59 m_1$, т. е. уменьшатся почти на 40 %, или в 1,7 раза.

Эта же закономерность практически справедлива и для электрических машин. Вот почему при автономных системах электроснабжения (корабли, самолеты, вспомогательные машины некоторых видов электроподвижного состава) применяют частоту 400 или 500 Гц.

Следует отметить, что увеличение частоты при неизменном числе полюсов целесообразно лишь до определенных пределов, выше которых размеры и масса машины вновь начинают возрастать, так как приходится снижать электромагнитные нагрузки, поскольку *по механическим причинам максимальная окружная скорость ограничена.* Сказанное справедливо для машин, аналогичных по своей конструктивной схеме.

15.3. Технико-экономические показатели тяговых двигателей

Характерной особенностью тяговых двигателей является широкий диапазон регулирования их частоты вращения, определяемый отношением максимальной и номинальной скоростей движения локомотива:

$$k_v = v_{max}/v_{ном} = n_{max}/n_{ном}. \quad (15.12)$$

У тепловозов и промышленных электровозов $k_v = 3 \div 4$, что значительно больше, чем у магистральных электровозов. В то же время эта величина, оказывающая существенное влияние на массо-габаритные показатели машин, никак не учитывается формулой (15.2, б).

По условиям механической прочности и устойчивости работы контакта щетка — коллектор максимальные окружные скорости якоря и коллектора ограничены значениями $v_{я\,max} \leqslant 70$ м/с и $v_{к\,max} \leqslant 55$ м/с.

Если максимально допустимой окружной скорости соответствует максимальная частота вращения n_{max}, то при номинальной частоте вращения $n_{ном}$ окружная скорость

$$v_{я.ном} = v_{я\,max}\frac{n_{ном}}{n_{max}}. \quad (15.13)$$

В общем случае $v_я = \pi D_я n$, или $D_я n_{ном} = v_{я.ном}/\pi$; тогда с учетом (15.12) и (15.13)

$$D_я n_{ном} = \frac{v_{я\,max} n_{ном}}{\pi n_{max}} = \frac{v_{я\,max}}{\pi k_v}. \qquad (15.14)$$

Подставив (15.14) в (15.2, б) и преобразовав, получим

$$P_{эм} = \frac{\pi}{k_v} A\alpha B_\delta D_я l_я v_{я\,max} = \frac{D_я l_я v_{я\,max}}{\pi k_v C_A} = C'_A \frac{D_я l_я}{k_v}, \quad (15.15)$$

где $C'_A = v_{я\,max}/(\pi C_A)$ — постоянная.

Из уравнения (15.15) следует, что *при ограничении окружной скорости и заданной мощности размеры якоря возрастают с ростом* k_v. Это следует учитывать при расчете технико-экономических показателей (мощность на единицу массы, расход материалов на единицу мощности и т. п.) и оперировать величиной *расчетной мощности* $P_р = k_v P_{эм} = C'_A D_я l_я$, поскольку она определяет размеры якоря, что для аналогичных машин равноценно размерам всей машины. Следует иметь в виду, что эти размеры ограничены тем «жизненным пространством», в котором размещен тяговый двигатель под кузовом локомотива.

Пример. Максимальная и номинальная скорости магистрального электровоза равны 110 и 53 км/ч, а карьерного — соответственно 85 и 25 км/ч. Определить электромагнитную мощность их тяговых двигателей, если возможны следующие значения нагрузок и размеров якоря: $A = 45\,000$ А/м, $\alpha = 0{,}68$, $B_\delta = 0{,}95$ Тл, $v_{я_{max}} = 65$ м/с, $D_я = 0{,}66$ м и $l_я = 0{,}4$ м.

Решение. Воспользовавшись формулой (15.15), определим расчетную мощность, которая, очевидно, одинакова для обоих двигателей:

$$P_р = k_v P_{эм} = \pi \cdot 45\,000 \cdot 0{,}68 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}66 \cdot 0{,}4 \cdot 65 = 1\,567\,156 \text{ Вт} \approx 1567 \text{ кВт}.$$

Коэффициенты регулирования скорости магистрального и карьерного электровозов равны соответственно

$$k_{vм} = 110/53 = 2{,}075; \qquad k_{vк} = 85/25 = 3{,}4.$$

Электромагнитные мощности, которые смогут развить тяговые двигатели магистрального и карьерного электровозов, соответственно равны

$$P_{эм.м} = 1567/2{,}075 \approx 755 \text{ кВт}; \qquad P_{эм.к} = 1567/3{,}4 \approx 461 \text{ кВт}.$$

15.4. Выбор электродвигателя в зависимости от условий его работы

Выбор электродвигателей производится по следующим параметрам и показателям: роду тока и номинальному напряжению, номинальным мощности и частоте вращения, виду естественной механической характеристики, а также по пусковым, регулировочным, тормозным качествам и конструктивному исполнению. Важной задачей является правильный выбор двигателей для работы в определенных условиях окружающей среды.

При выборе двигателя по мощности важно предусмотреть полное использование ее в процессе работы. Двигатель завышенной, по сравнению с требуемой, мощности работает недогруженным и имеет худшие КПД и коэффициент мощности. Двигатель заниженной мощности будет перегружен током, что приведет к большим потерям энергии и, как следствие, превышению температуры его обмоток сверх допустимой. Поэтому *температура обмоток двигателя является главным критерием, по которому выбирают двигатель по мощности.*

В ряде случаев задача выбора двигателя по мощности осложняется еще и тем, что нагрузка на его валу в процессе работы не остается постоянной, а изменяется во времени, вследствие чего изменяется температура обмоток двигателя. Если изменение нагрузки на валу двигателя во времени известно, то можно судить о характере изменения потерь энергии в двигателе, что позволяет выбрать двигатель таким образом, чтобы температура его обмоток не превышала допустимой. При этом будет соблюдено условие обеспечения надежной работы двигателя в течение всего срока его эксплуатации.

Для кратковременной работы могут использоваться двигатели, предназначенные для продолжительного режима.

Для работы в повторно-кратковременных режимах используются, как правило, специально предназначенные двигатели. Все их технические данные приводятся в каталогах для стандартных значений ПВ. Например, если в паспорте двигателя для привода компрессора электровоза указано, что ПВ=50 % (21 кВт), то можно реализовать мощность 21 кВт, не опасаясь перегрева, только в течение рабочего времени, составляющего 50 % продолжительности цикла. Остальное время цикла (50 %) двигатель должен не работать (пауза). Один и тот же двигатель допускает работу при различных ПВ. Но чем больше ПВ, тем меньше должна быть его нагрузка.

Продолжительный режим может протекать с постоянной или переменной нагрузкой. Номинальная мощность, указанная в каталоге, и есть та *наибольшая мощность, которая может быть развита двигателем при постоянной нагрузке на его валу.*

Выбор двигателя, работающего продолжительное время с переменной нагрузкой (нагрузочная диаграмма показана на рис. 15.2), производится по методу средних потерь или методам эквивалентных тока, момента и мощности.

Метод средних потерь. Основан на том предположении, что двигатель будет работать по заданному графику нагрузки без превышения допустимой температуры, если средние потери этого графика нагрузки $\Sigma p_{ср}$ не превышают полных потерь энергии при номинальном режиме работы двигателя $\Sigma p_{ном}$, т. е. соблюдается условие

$$\Sigma p_{ср} \leqslant \Sigma p_{ном}. \tag{15.16}$$

Зная номинальные значения КПД $\eta_{ном}$ и полезной мощности $P_{2ном}$ и используя формулу (13.8), можно определить полные потери энергии в номинальном режиме:

$$\Sigma p_{ном} = P_{2ном} (1/\eta_{ном} - 1). \qquad (15.17)$$

Пусть любому отрезку времени t_i, согласно нагрузочной диаграмме изменения потерь на рис. 15.2, соответствует реализуемая двигателем мощность P_i, при которой полные потери в нем составляют Σp_i. Тогда средние потери за все время работы двигателя

$$\Sigma p_{ср} = \frac{\Sigma p_1 t_1 + \Sigma p_2 t_2 + \cdots + \Sigma p_n t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}. \qquad (15.18)$$

Метод средних потерь достаточно точен и может быть использован при выборе электродвигателя любого типа. Однако он требует проведения конкретных расчетов потерь для каждого участка, что не всегда выполнимо.

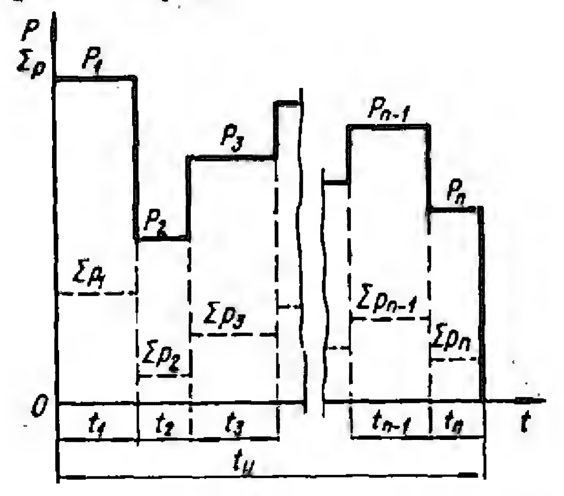


Рис. 15.2. Нагрузочная диаграмма и изменение потерь в двигателе при продолжительном режиме работы и переменной нагрузке

Метод эквивалентного тока. Основан на использовании метода средних потерь. При этом считается, что средние потери $\Sigma p_{ср}$ создаются в двигателе, нагруженном таким расчетным неизменяющимся (эквивалентным) током $I_{эк}$, который выделяет за время работы то же количество теплоты, что и действительные токи. Соответствующий току $I_{эк}$ коэффициент нагрузки назовем *эквивалентным*: $k_{н.э} = I_{эк}/I_{ном}$. Тогда, согласно выражениям (13.7) и (15.8), имеем:

$$\Sigma p_{ср} = p_0 + (k_{н.э})^2 p_{м.ном} =$$

$$= \frac{(p_0 + k_{н1}^2 p_{м.ном}) t_1 + (p_0 + k_{н2}^2 p_{м.ном}) t_2 + \cdots + (p_0 + k_{нn}^2 p_{м.ном}) t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}.$$

Подставив сюда значения коэффициентов нагрузки, исключив члены с p_0, сократив остальные на $p_{м.ном}/I_{ном}^2$ и преобразовав, найдем значение эквивалентного тока

$$I_{эк} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \cdots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} I_i^2 t_i}{t_ц}}, \qquad (15.19)$$

где $t_ц$ — продолжительность полного цикла работы двигателя. Двигатель выбран правильно, если соблюдается условие

$$I_{эк} \leqslant I_{ном}. \qquad (15.20)$$

Метод эквивалентного тока, основанный на методе средних потерь, также может быть использован для выбора любых двигателей.

Метод эквивалентного момента. Напомним, что вращающий момент двигателей постоянного тока параллельного и независимого возбуждений, а также синхронных, согласно выражению (7.16), $M = c'_M I_я$.

Это обстоятельство позволяет ввести понятие эквивалентного момента $M_{эк}$, соответствующего эквивалентному току $I_{эк}$:

$$M_{эк} = c'_M I_{эк}, \text{ или } I_{эк} = M_{эк}/c'_M.$$

Следовательно, аналогично (15.19) выражение эквивалентного момента имеет вид

$$M_{эк} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \cdots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} M_i^2 t_i}{t_ц}}. \quad (15.21)$$

Условие правильного выбора двигателя

$$M_{эк} \leqslant M_{ном}. \quad (15.22)$$

Метод эквивалентной мощности. Позволяет через эквивалентную неизменную мощность $P_{эк}$ (мощность, которая по условиям нагрева равноценна действительной изменяющейся мощности) оценить нагревание двигателя. Этот метод применим в тех случаях, когда при изменении нагрузки угловая скорость двигателя остается постоянной или меняется незначительно, т. е. $\Omega \approx \text{const}$ (жесткая естественная механическая характеристика).

Поскольку $P_{ном} = M_{ном}\Omega_{ном}$ и $P_{эк} = M_{эк}\Omega_{ном}$, из (15.21) получим выражение эквивалентной мощности

$$P_{эк} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \cdots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} P_i^2 t_i}{t_ц}}. \quad (15.23)$$

Двигатель выбран правильно, если выполняется условие

$$P_{эк} \leqslant P_{ном}. \quad (15.24)$$

Методы эквивалентных момента и мощности применимы для предварительного выбора двигателя и расчетов, не требующих большой точности. Эти методы *совершенно неприемлемы для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения,* так как у них магнитный поток и частота вращения резко меняются с изменением тока нагрузки.

Выбранный по любому из методов двигатель необходимо проверить также на допустимую перегрузку, чтобы максимальные значения тока, вращающего момента или мощности (по нагрузочной диаграмме) не превзошли соответствующих величин, допустимых для данного двигателя.

Контрольные вопросы

1. Чем определяются размеры якоря электрической машины?
2. Почему выгодно увеличивать частоту вращения машины в номинальном режиме?
3. Как влияет частота питающего напряжения на размеры электрических машин и трансформаторов?
4. Почему на моторвагонном подвижном составе устанавливают синхронный генератор, который напряжением частотой 400 Гц питает вспомогательные асинхронные двигатели?
5. Как влияет диапазон регулирования тяговых двигателей на их размеры или мощность?
6. Какие требования предъявляются при выборе двигателя? В каких случаях применимы методы средних потерь и эквивалентных величин?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А. Е.* Конструкция электрических машин.— М. : Госэнергоиздат, 1958.— 426 с.
2. *Безрученко В. Н., Браташ В. А., Петрович Л. В.* Электроподвижной состав промышленного железнодорожного транспорта.— К. : Вища шк. Головное изд-во, 1982.— 248 с.
3. *Безрученко В. Н., Хотян А. С.* Электрические машины.— К. : Вища шк. Головное изд-во, 1979.— 192 с.
4. *Брускин Д. Э., Зорохович В. С., Хвостов В. С.* Электрические машины.— М. : Высш. шк., 1987.— Ч. I.— 319 с.; Ч. 2.— 335 с.
5. *Вольдек В. И.* Электрические машины.— М. : Высш. шк., 1974.— 832 с.
6. *Кацман М. М.* Электрические машины.— М. : Высш. шк., 1983.— 432 с.
7. *Костенко М. П., Пиотровский Л. М.* Электрические машины.— Л. : Энергия, 1973.— Ч. I.— 543 с.; Ч. 2.— 648 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ